



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

LUIZ FILIPE CAMPOS DO CANTO

**METODOLOGIA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES
EÓLICAS ONSHORE**

Recife

2018

LUIZ FILIPE CAMPOS DO CANTO

**METODOLOGIA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES
EÓLICAS ONSHORE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa de Seixas

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicêa Alves, CRB-4 / 1260

C232m Canto, Luiz Filipe Campos do.
Metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas onshore. / Luiz Filipe Campos do Canto - 2018.
250folhas, Il.; Tab.; Abr. e Sigl.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa de Seixas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018.

Inclui Referências, Anexos e Apêndices.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Torres eólicas onshore. 3. Métodos geodésicos/topográficos. 4. Monitoramento geodésico. I. Seixas, Andrea (Orientadora). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.) BCTG/2019-38

LUIZ FILIPE CAMPOS DO CANTO

**METODOLOGIA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES
EÓLICAS ONSHORE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 07/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Andréa de Seixas (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Francisco Jaime Bezerra Mendonça (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Ana Rosa Mendes Primo (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta pesquisa a Deus, meus pais e irmão por me guiarem nessa jornada e serem meu apoio em momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus, senhor pertencente a terra e tudo o que nela se contém, o mundo e os que nele habitam. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar onde cheguei e por todas as minhas conquistas.

Ao meu pai, Luiz Abel, minha mãe, Vera Campos e irmão, Italo Canto. A vocês eu devo tudo que hoje sou. Agradeço por durante toda essa vida, até hoje, terem sido meus pilares, meus exemplos, meus tudo. Deus foi muito generoso comigo, e meu coração nada em gratidão e felicidade por ter uma maravilhosa família.

A minha orientadora, Andréa de Seixas, por seu sua amizade, paciência, empenho e profissionalismo exemplar. Suas motivações foram de suma importância para realização da pesquisa. Reforço o apoio incondicional proporcionado, a forma interessada, formidável e pertinente como guiou e acompanhou a realização desta dissertação. Deus a recompensará grandiosamente.

A Eduardo Moura, Redmilton Melo e a todos da Eólica Gravatá Geradora de Energia S.A. pela autorização da pesquisa nas torres do parque eólico, coleguismo e por oferecerem suporte e apoio técnico.

Aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Leonardo Carlos Barbosa, Priscilla Heliênay Oliveira do Nascimento Pestana e Welisson José dos Santos, pela amizade e contribuição nos levantamentos geodésicos.

Aos Professores Doutores participantes da banca examinadora, Silvio Jack dos Anjos Garnés, Francisco Jaime Bezerra Mendonça e Ana Rosa Mendes Primo, pelas orientações, discussões, apoio, paciência, disponibilidade em me ajudar e pelos pertinentes conselhos dados sempre que a procurei. Assim como, os Professores Doutores José Eduardo Ferreira de Oliveira e Carlos Alberto Borba Schuler, integrantes da comissão examinadora desta dissertação. Seus nomes são inesquecíveis e por isso, dedico-lhes minha profunda admiração e respeito.

A minha prima Berenice pelo empréstimo da hospedagem em Gravatá, mas principalmente por seu carinho, apoio e orações que ajudaram a modificar a minha realidade.

Aos meus familiares, em especial a meus tios Eduardo Campos e José Carlos, e minhas tias Ana Campos, Socorro Campos, Rosângela e Marta, por todo apoio, carinho, orações e companheirismo nos momentos difíceis.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos durante todo o mestrado.

Ao Projeto de Pesquisa Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG CTG/UFPE processo nº 3076.040512/2015-15.

A Universidade Federal de Pernambuco, através do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, por disponibilizar o Laboratório de Geodésia (LAGEO) e Laboratório de Topografia (LATOP), assim como a concessão dos equipamentos e acessórios.

A Elizabeth Galdino, da secretaria da Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação pela atenção, ajuda e dedicação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação que colaboraram e construíram bases sólidas no meu desenvolvimento e aprendizagem.

E a todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para esta dissertação.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas *onshore*, para averiguar a existência de deslocamentos a partir de pontos-objeto localizados na torre e na base da fundação. O monitoramento foi realizado nas torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02 do Parque Eólica Gravatá Geradora de Energia S.A., localizado no município brasileiro de Gravatá-PE, a partir de um Sistema de Referência de Medição estável, cujos pontos de referência formam uma configuração de um triângulo equilátero e de um hexágono regular, definindo-se o centro de simetria das geometrias coincidentes ao centroide da torre eólica. Esta configuração permite avaliar a verticalidade e a geometria da torre através de alvos refletivos alinhados com os pontos de referência do triângulo regular e o centro da torre, e por meio das soldas transversais (ST) entre os segmentos da torre e respectivas bordas. Para avaliar possíveis recalques da fundação, foram implantados pinos, com superfícies semiesféricas, nas bases das torres a serem monitoradas, por meio de nivelamento geométrico de alta precisão. Para avaliar possíveis movimentos da torre Gravatá 02 foram empregados os métodos geodésicos/topográficos: Poligonação com centragem forçada, irradiação tridimensional, método de medição das bordas e nivelamento trigonométrico de visadas unilaterais. A interligação com o Sistema Geodésico de Referência (SGR) oficial do Brasil foi feita a partir do posicionamento GNSS método relativo estático nos 03 vértices do triângulo e 01 vértice do hexágono. Os pontos de referência foram ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados através do modelo Paramétrico e testados estatisticamente, apresentando desvios padrão planimétricos mínimo de $\pm 0,00922$ m e máximo com $\pm 0,01813$ m. Os dados levantados da torre eólica foram processados pelo Método dos Mínimos Quadrados, utilizando os modelos combinado e paramétrico, obtendo como resultados as coordenadas ajustadas do baricentro das seções circulares das soldas transversais da torre eólica em diferentes cotas. Nas torres eólicas foram realizadas duas campanhas de medições e tiveram como resultados a obtenção dos diâmetros das seções circulares formadas pelas soldas transversais (ST) e as suas respectivas coordenadas do centro geométrico. Com estas coordenadas, foram definidos a origem do alinhamento de referência e realizado a diferença linear entre centros geométricos, os ângulos de deflexão e respectivas direções. Verifica-se na torre Gravatá 02, em relação a variação de cotas entre as duas campanhas, uma diferença máxima de

0,00001 ± 0,00006 m no pino RN01 e na torre Gravatá 01 de 0,00086 ± 0,00053 m no pino RN06. Os raios médios foram de 1,8431 ± 0,0005 m (ST01) e de 1,6994 ± 0,0268 m da ST22. O cálculo médio da deflexão entre as coordenadas do centro da seção circular da ST22 e do alinhamento vertical de referência foi de 0°2'39.22" ± 2.83" na direção Noroeste e diferença linear média de 0,0878 ± 0,0078 m. O ângulo de deflexão do topo foi de 0°8'44.88" e diferença linear de 0,2590 m, definido a partir de uma função não linear ajustada por MMQ, devido a impossibilidade de medições do topo da torre.

Palavras-chave: Torres eólicas onshore. Métodos geodésicos/topográficos. Monitoramento geodésico.

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to study onshore wind towers and associated foundations, with the purpose of developing a methodology for the geodetic monitoring in onshore wind towers, to investigate the existence of displacements from object points located in the tower and the base of the foundation. The monitoring was carried out in Gravatá 01 and Gravatá 02 wind towers of the Gravatá Geradora de Energia S.A., located in the Brazilian city of Gravatá-PE, from a stable Measurement Reference System, whose reference points form a configuration of an equilateral triangle and a regular hexagon, defining the center of symmetry of the coincident geometries to the centroid of the wind tower. This configuration allows to evaluate the verticality and geometry of the tower by means of reflective targets aligned with the reference points of the implanted regular triangle and the center of the tower, and by means of the transverse welds (ST) between the tower segments and respective edges. In order to evaluate possible basements of the foundation, pins with semi-spherical surfaces were implanted at the bases of the towers to be monitored by means of high precision. In order to evaluate possible movements of the Gravatá 02 tower, the following geodetic/topographic methods were used: Poligonation with forced centering, three-dimensional irradiation, edge measurement method and trigonometric leveling of unilateral visions. The interconnection with the official Brazilian Geodetic Reference System (SGR) was done from the GNSS positioning relative static method in the 03 vertices of the triangle and 01 vertex of the hexagon. The reference points were adjusted by the least squares method using the Parametric model and were statistically tested, with minimum standard deviations of $\pm 0,00922$ m and maximum with $\pm 0,01813$ m. The data collected from the wind tower were processed using the least squares method, using the combined and parametric models, obtaining as results the adjusted coordinates of the barycentre of the circular sections of the transverse welds of the wind tower at different heights. Two measurement campaigns were carried out in the wind towers and the results obtained were the diameters of the circular sections formed by the transverse welds (ST) and their respective coordinates of the geometric center. With these coordinates, the origin of the reference alignment was defined and the linear difference between geometric centers, the deflection angles and their respective directions was performed. In the Gravatá 02 tower, in relation to the variation of dimensions between the two seasons, a maximum difference of $0,00001 \pm 0,00006$ m

in the pin RN01 and in the Gravatá 01 tower of $0,00086 \pm 0,00053$ m in the pin RN06. The mean radii were $1,8431 \pm 0,0005$ m (ST01) and $1,6994 \pm 0,0268$ m ST22. The mean deflection calculation between the center coordinates of the ST22 circular section and the vertical reference alignment was $0^{\circ}2'39,22'' \pm 2,83''$ in the Northwest direction and mean linear difference of 0.0878 ± 0.0078 m. The top deflection angle was $0^{\circ}8'44.88''$ and a linear difference of $0,2590$ m, defined from a nonlinear function fitted by MMQ, due to the impossibility of measurements from the top of the tower.

Keywords: Onshore wind towers. Geodetic/topographic methods. Geodetic monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Resumo dos acidentes mundiais com torres eólicas.....	39
Figura 2 –	Partes integrante da torre eólica. (a) nacelle. (b) cubo do rotor (c) pá eólica. (d) torre.....	42
Figura 3 –	Vista do interior da nacelle de um aerogerador utilizando um gerador convencional	42
Figura 4 –	Detalhe de um cubo para fixação das pás	44
Figura 5 –	Configurações usuais de torres eólicas. (a) Treliçadas de aço. (b) Monopolos de aço. (c) Híbridas de aço-concreto ...	45
Figura 6 –	Flanges. (a) Visão geral. (b) Conexão aparafusada da flange interna da torre eólica	46
Figura 7 –	Duas seções de uma típica torre tubular de aço	46
Figura 8 –	Variações de fundações rasas.....	48
Figura 9 –	Variações de fundações profundas	48
Figura 10 –	Graus de liberdade em uma torre eólica	51
Figura 11 –	Carga do vento atuando em uma torre eólica.....	52
Figura 12 –	Exemplo do método polar	57
Figura 13 –	Representação do método de posicionamento por satélites relativo estático	58
Figura 14 –	Esquema representativo da centragem forçada	61
Figura 15 –	Nivelamento trigonométrico.....	62
Figura 16 –	Nivelamento trigonométrico em longas distâncias.....	64
Figura 17 –	Princípio do Nivelamento Geométrico.....	65
Figura 18 –	Sistema geodésico cartesiano topocêntrico.....	68
Figura 19 –	Representação do monitoramento de um campo de pontos-objeto.....	69
Figura 20 –	Princípio da irradiação tridimensional.....	71
Figura 21 –	Princípio da interseção à vante.....	72
Figura 22 –	Leitura de direções e cálculo do ângulo.....	73
Figura 23 –	Método de medição de bordas para determinar a direção horizontal do centro.....	74
Figura 24 –	Método de Kukkamaki.....	76

Figura 25 –	Processo iterativo para o MMQ sob o modelo Paramétrico para modelos não-lineares.....	81
Figura 26 –	Processo iterativo para o MMQ sob o modelo Combinado para modelos não-lineares.	84
Figura 27 –	Elipse do erro	91
Figura 28 –	Método Polar na medição do ponto ST1 a partir do vértice LP4.....	92
Figura 29 –	Mapa de localização do parque eólico da Eólica Technology Ltda.....	97
Figura 30 –	Torre eólica pesquisada. (a) Especificações dimensionais da torre eólica. (b) Torre eólica monitorada.....	97
Figura 31 –	Sapata Isolada Circular.....	98
Figura 32 –	Fluxograma seriado para o desenvolvimento do projeto.....	99
Figura 33 –	Reconhecimento no entorno das torres eólicas área da pesquisa.....	101
Figura 34 –	Configuração geométrica para a distribuição dos pontos de referência no entorno da torre eólica.....	102
Figura 35 –	Determinação da distância mínima para implantação dos marcos de referência.....	103
Figura 36 –	Locação dos vértices.....	104
Figura 37 –	Materialização dos vértices. (a) Marcos de concreto. (b) Pinos com superfície semiesférica. (c) Haste de ferro.....	106
Figura 38 –	Pontos de Referência materializados por marcos de concreto e hastes de ferro.....	106
Figura 39 –	Pontos-objeto materializados por pinos com cabeça semiesférica.....	107
Figura 40 –	Pontos-Objeto através das soldas transversais entre segmentos da torre (a) e alvos refletivos (b)	108
Figura 41 –	Campanha do levantamento GNSS	109
Figura 42 –	Elipses dos erros dos pontos de referência	116
Figura 43 –	verificação do Nível Digital.....	117
Figura 44 –	Verificação das estações totais no hall-jardim do NIATE CCEN/CTG.....	119

Figura 45 –	Soldas transversais medidas sobre os pontos de referência do hexágono regular.....	121
Figura 46 –	Esquema dos circuitos realizados com o nivelamento geométrico.....	123
Figura 47 –	Procedimento para a medição das soldas transversais.....	124
Figura 48 –	Procedimento para a medição de bordas da torre eólica.....	125
Figura 49 –	Circuito no entorno da torre Gravatá 02 e o percurso do nivelamento geométrico entre a RN02 e RN04 da primeira campanha.....	126
Figura 50 –	Circuito no entorno da torre Gravatá 01 e dificuldades apresentadas no contranivelamento entre a RN04 e RN02 da primeira campanha.....	127
Figura 51 –	Dificuldades apresentadas durante as medições do segundo dia da primeira campanha.....	127
Figura 52 –	Nivelamento geométrico da segunda campanha.....	129
Figura 53 –	Dificuldades apresentadas durante as medições do segundo dia da segunda campanha.....	129
Figura 54 –	Medições do terceiro dia da segunda campanha	130
Figura 55 –	Exemplo de ângulo de deflexão em uma torre eólica.	131
Figura 56 –	Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de L1, L2 e L3 (primeira campanha).....	139
Figura 57 –	Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de LP1, LP2 e LP3 (primeira campanha).	140
Figura 58 –	Média das Coordenadas x (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d).	142
Figura 59 –	Média das Coordenadas x (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): LP1 (a), LP2 (b), LP3 (c) e o agrupamento (d)	143
Figura 60 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d)	144

Figura 61 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional)	144
Figura 62 –	Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x , y) e raio da seção circular da solda transversal através do MMQ modelo combinado	146
Figura 63 –	Modelo combinado: Coordenadas x da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	150
Figura 64 –	Modelo combinado: Coordenadas y da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.	151
Figura 65 –	Modelo combinado: Coordenadas x e y da primeira campanha a partir dos pontos LP1, LP2 e LP3.....	152
Figura 66 –	Raios das seções circulares da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	152
Figura 67 –	Raios das seções circulares da primeira campanha a partir dos pontos LP1, LP2 e LP3	153
Figura 68 –	Comparativos dos raios de ST2 a ST5 (primeira campanha).	154
Figura 69 –	Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x , y) da seção circular da solda transversal através do método paramétrico	156
Figura 70 –	Modelo paramétrico: Coordenadas x da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	160
Figura 71 –	Modelo paramétrico: Coordenadas y da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	160
Figura 72 –	Modelo paramétrico: Coordenadas x e y da primeira campanha a partir dos pontos LP1 e LP2	161
Figura 73 –	Modelo paramétrico: Comparativos das coordenadas (x , y) de ST2 a ST5 (primeira campanha).....	161
Figura 74 –	Figura 74 – Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de irradiação tridimensional da primeira campanha	164

Figura 75 –	Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de bordas da primeira campanha	164
Figura 76 –	Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de L1, L2 e L3 (segunda campanha)	170
Figura 77 –	Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 (segunda campanha) ..	170
Figura 78 –	Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d)	172
Figura 79 –	Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP1(a) e LP2(b)	172
Figura 80 –	Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP3(a) e LP4(b)	173
Figura 81 –	Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP5(a) e LP6(b)	173
Figura 82 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d)	174
Figura 83 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP1 (a) e LP2 (b)	175
Figura 84 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP3 (a) e LP4 (b)	175
Figura 85 –	Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP5 (a) e LP6 (b)	175
Figura 86 –	Modelo combinado: Coordenadas x da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	177
Figura 87 –	Modelo combinado: Coordenadas y da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	177
Figura 88 –	Modelo combinado: Coordenadas x e y da segunda campanha a partir dos pontos LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6	178

Figura 89 –	Raios das seções circulares da segunda campanha a partir dos pontos de referência do hexágono e do triângulo	179
Figura 90 –	Modelo paramétrico: Coordenadas x da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	181
Figura 91 –	Modelo paramétrico: Coordenadas y da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3	182
Figura 92 –	Modelo paramétrico: Coordenadas (x, y) da segunda campanha a partir dos pontos LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6	183
Figura 93 –	Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de irradiação tridimensional da segunda campanha	184
Figura 94 –	Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de bordas da segunda campanha	185
Figura 95 –	Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (primeira campanha)	188
Figura 96 –	Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (segunda campanha)	188
Figura 97 –	Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (primeira e segunda campanha)	189
Figura 98 –	Raios das seções circulares obtidos pelo método de irradiação tridimensional (primeira e segunda campanha)..	190
Figura 99 –	Ajuste polinomial da função do deslocamento linear em relação a cota	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Capacidade instalada em 2017	39
Tabela 2 –	Classificação dos Níveis conforme norma ABNT (1994)	66
Tabela 3 –	Classificação dos Níveis conforme Deumlich (1982).	67
Tabela 4 –	Planilha da poligonal de reconhecimento ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico	102
Tabela 5 –	Caderneta de locação	105
Tabela 6 –	Época da campanha GNSS	109
Tabela 7 –	Tempo de rastreamento	110
Tabela 8 –	Coordenadas Cartesianas Geocêntricas dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000	110
Tabela 9 –	Coordenadas Geodésicas dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000	110
Tabela 10 –	Desvios padrão dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000	111
Tabela 11 –	Valores das ondulações geoidais	111
Tabela 12 –	Valores das coordenadas no SGL	112
Tabela 13 –	Cálculo analítico do ângulo, distância e azimute da poligonal fechada	113
Tabela 14 –	Cálculo analítico das coordenadas totais tridimensionais da poligonal fechada	113
Tabela 15 –	Elementos da poligonal ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico	114
Tabela 16 –	Coordenadas da poligonal ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico	115
Tabela 17 –	Desvios-padrão, erro posicional e controle de qualidade do ajustamento MMQ – Modelo Paramétrico (1σ)	115
Tabela 18 –	Semieixo maior, semieixo menor e orientação das elipses dos erros dos pontos de referência	115

Tabela 19 –	Verificação através do Método de Kukkamäki ocorrida em 09/04/2018	116
Tabela 20 –	Verificação através do Método de Kukkamäki ocorrida em 30/08/2018	118
Tabela 21 –	Verificação das estações totais nas duas campanhas de medição	118
Tabela 22 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito I (primeira campanha) -Torre Gravatá 02	120
Tabela 23 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito II (primeira campanha) - Torre Gravatá 01	132
Tabela 24 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito III (primeira campanha) - Entre a Torre Gravatá 02 e Torre Gravatá 01	133
Tabela 25 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 02 (primeira campanha)	133
Tabela 26 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 01 (primeira campanha)	134
Tabela 27 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias do circuito e precisão do nivelamento realizados entre as RN02 e RN04 (primeira campanha)	134
Tabela 28 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I (primeira campanha).....	134
Tabela 29 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito II (primeira campanha)	136

Tabela 30 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito III (primeira campanha)	137
Tabela 31 –	Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no nivelamento (primeira campanha) – Circuito I	137
Tabela 32 –	Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no contranivelamento (primeira campanha) – Circuito II.....	138
Tabela 33 –	Cotas médias ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidos no nivelamento e contranivelamento (primeira campanha).....	139
Tabela 34 –	Medidas de dispersão da primeira campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3	141
Tabela 35 –	Medidas de dispersão da primeira campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3	142
Tabela 36 –	Parâmetros aproximados das coordenadas do centro da solda transversal e raio.....	147
Tabela 37 –	Desvios padrão planimétrico para os pontos de referência L1, L2, L3 e LP3.....	149
Tabela 38 –	Azimuthes referentes a direção horizontal da solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 da primeira campanha.....	154
Tabela 39 –	Azimuthes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP1 e LP2 (primeira campanha).....	155
Tabela 40 –	Distância horizontal média para os pontos de referência	162
Tabela 41 –	Ângulo de deflexão para as coordenadas do centro da seção circular obtidas no método de irradiação tridimensional e de medição de bordas (primeira campanha).	162

Tabela 42 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito I (segunda campanha) -Torre Gravatá 02	165
Tabela 43 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito II (segunda campanha) -Torre Gravatá 01.....	166
Tabela 44 –	Resultados das linhas, número de lances, desníveis e distâncias brutos do nivelamento e contranivelamento do circuito III (segunda campanha) - Entre a Torre Gravatá 02 e Torre Gravatá 01.....	166
Tabela 45 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 02 (segunda campanha)	167
Tabela 46 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 01 (segunda campanha)	167
Tabela 47 –	Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados entre as RN02 e RN04 (segunda campanha).....	167
Tabela 48 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I (segunda campanha)	168
Tabela 49 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito II (segunda campanha).....	168
Tabela 50 –	Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito III (segunda campanha).....	168
Tabela 51 –	Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no nivelamento (segunda campanha).....	169
Tabela 52 –	Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no contranivelamento (segunda campanha).	169

Tabela 53 –	Cotas médias ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão (segunda campanha).....	169
Tabela 54 –	Medidas de dispersão da segunda campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3.....	171
Tabela 55 –	Medidas de dispersão da segunda campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.....	171
Tabela 56 –	Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 (segunda campanha)	180
Tabela 57 –	Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3 (segunda campanha).....	180
Tabela 58 –	Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP4, LP5 e LP6 (segunda campanha).....	180
Tabela 59 –	Ângulo de deflexão em relação a origem do alinhamento de referência do centro de ST1 para os resultados obtidos no método de irradiação tridimensional e o método de bordas...	183
Tabela 60 –	Diferenças de cotas obtidas nas duas campanhas de medição.....	186
Tabela 61 –	Diferenças de cotas obtidas nas duas campanhas de medição desconsiderando o contranivelamento da primeira campanha.....	187
Tabela 62 –	Raio médio e respectivos desvios padrão das soldas transversais	190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCD	Charge Coupled Device
DD	Dupla Diferença
GNSS	Global Navigation Satellite System
Ltda.	Limitada
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MDT	Modelo Digital do Terreno
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MTM	Métodos Terrestres de Medição
MVC	Matriz Variância-Covariância
PD	Posição Direta
PI	Posição Indireta
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
Gram	Gramática
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RN	Referência de Nível
RRNN	Referências de Nível
S.A.	Sociedade Anônima
SCA	Sistema de Controle Ativo
ST	Solda Transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	34
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	36
1.1.1	Objetivo Geral	36
1.1.2	Objetivos Específicos.....	36
1.2	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	36
2	MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES EÓLICAS ONSHORE. 38	
2.1	ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO EM TORRES EÓLICAS	38
2.2	DESCRIÇÃO DO OBJETO – TORRE EÓLICA.....	42
2.2.1	Nacelle	42
2.2.2	Pás	43
2.2.3	Cubo do Rotor	44
2.2.4	Torre	44
2.2.5	Fundação.....	47
2.3	MODELO DINÂMICO DE DEFORMAÇÃO	48
2.4	ESTÁTICA NAS ESTRUTURAS EÓLICAS.....	51
2.5	DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA.....	53
2.5.1	Análise Espacial para o Posicionamento dos Pontos de Referência 53	
2.5.2	Reconhecimento e Levantamento de Campo	54
2.5.3	Procedimentos de Locação – Método Polar com Estação Total	56
2.6	LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA	58
2.6.1	Método de Posicionamento por Satélites Relativo Estático	58
2.6.2	Rede Planimétrica.....	59
2.6.2.1	Método de Poligonação com Centragem Forçada	59
2.6.3	Rede Altimétrica.....	61
2.6.3.1	Método do Nivelamento Trigonométrico de Visadas Unilaterais	62

2.6.3.2	Método do Nivelamento Geométrico de Alta Precisão	64
2.6.4	Transformação de Coordenadas Tridimensionais Geocêntricas em Coordenadas no Sistema Geodésico Local	67
2.7	DEFINIÇÃO DE PONTOS-OBJETO	69
2.8	LEVANTAMENTO DOS PONTOS-OBJETO	70
2.8.1	Método da Irradiação Tridimensional	70
2.8.2	Método da Interseção à Vante	72
2.8.3	Método de Medição de Bordas	73
2.9	VERIFICAÇÃO E RETIFICAÇÃO INSTRUMENTAL	74
2.9.1	Verificação e Retificação de um Nível de Luneta	75
2.9.2	Método de Verificação dos Limbos Horizontal e Vertical da Estação Total	77
2.10	AJUSTAMENTO, ANÁLISE E CONTROLE DE QUALIDADE	78
2.10.1	MMQ - Modelo Paramétrico	79
2.10.2	MMQ - Modelo Combinado	82
2.10.3	Estimativa da Precisão dos Parâmetros e dos Resíduos	84
2.10.3.1	Matriz Variância-Covariância no Ajustamento pelo Modelo Paramétrico..	85
2.10.3.2	Matriz Variância-Covariância no Ajustamento pelo Modelo Combinado...	86
2.11	TESTES ESTATÍSTICOS	87
2.11.1	Variância da Unidade de Peso	87
2.11.2	Comparação entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$	87
2.11.3	Teste Data Snooping de Baarda para Identificação das Observações com Erros Grosseiros	89
2.12	ELIPSE DOS ERROS	90
2.13	PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	91
2.13.1	Propagação de Incertezas no Método Polar	92
3	EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS	96

3.1	ÁREA DE ESTUDO	96
3.1.1	Torres Eólicas Investigadas.....	97
3.1.2	Fundações das Torre Eólicas Pesquisadas.....	98
3.2	RECURSOS TECNOLÓGICOS.....	98
3.3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	99
3.4	ANÁLISES ESPACIAIS PARA O POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA.....	100
3.5	PROCEDIMENTOS DE LOCAÇÃO E MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS OBJETO.....	104
3.6	LEVANTAMENTO GNSS DOS PONTOS DE REFERÊNCIA	108
3.6.1	Definição do Sistema Geodésico Local e Transformação de Coordenadas	111
3.7	LEVANTAMENTOS DOS PONTOS DE REFERÊNCIA COM ESTAÇÃO TOTAL	112
3.8	PROCEDIMENTOS DE CAMPO PARA TESTE DO NÍVEL DIGITAL E ESTAÇÕES TOTAIS.....	117
3.8.1	Verificação do Nível Digital.....	117
3.8.2	Verificação das Estações Totais.....	119
3.9	PROCEDIMENTOS PARA O MONITORAMENTO DA TORRE EÓLICA	120
3.9.1	Descrição dos Pontos-Objeto Monitorados da Torre.....	120
3.9.2	Procedimentos para a Realização das Medições da Torre Eólica....	122
3.9.2.1	Procedimentos para o Monitoramento no Plano Vertical.....	122
3.9.2.2	Procedimentos para o Monitoramento no Plano Horizontal	123
3.10	CAMPANHAS DE MEDIÇÕES DA TORRE EÓLICA	122
3.10.1	Primeira Campanha de Medições	126
3.10.2	Segunda Campanha de Medições	128

3.11	RESULTADOS E ANÁLISES DO MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES EÓLICAS ONSHORE.....	130
4	RESULTADOS DO CONTROLE E MONITORAMENTO.....	132
4.1	RESULTADOS E ANÁLISES DA PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NA TORRE.....	132
4.1.1	Nivelamento Geométrico de Alta Precisão	132
4.1.1.1	Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico dos Circuitos	135
4.1.2	Método da Irradiação Tridimensional Aplicada na Torre	139
4.1.3	Ajustamento MMQ - Modelo Combinado das Seções Circulares da Torre.....	145
4.1.4	Método de Medição de Bordas Aplicada na Torre.....	154
4.1.5	Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico das Seções Circulares da Torre.....	155
4.1.6	Resultados e Análises do Comportamento Dinâmico da Torre	162
4.2	RESULTADOS E ANÁLISES DA SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NA TORRE.....	165
4.2.1	Nivelamento Geométrico de Alta Precisão	165
4.2.1.1	Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico dos Circuitos	167
4.2.2	Método da Irradiação Tridimensional Aplicada na Torre	170
4.2.3	Ajustamento MMQ - Modelo Combinado das Seções Circulares da Torre.....	176
4.2.4	Método de Medição de Bordas Aplicada na Torre.....	179
4.2.5	Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico das Seções Circulares da Torre.....	181
4.2.6	Resultados e Análises do Comportamento Dinâmico da Torre	183
4.3	ANÁLISE GERAL DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÕES NAS TORRES .	185
4.3.1	Análise do Monitoramento no Plano Vertical	186

4.3.2	Análise do Monitoramento no Plano Horizontal	187
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	193
5.1	CONCLUSÕES.....	193
5.2	RECOMENDAÇÕES	197
	REFERÊNCIAS	198
	APÊNDICE A - COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA) ..	206
	APÊNDICE B - COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	207
	APÊNDICE C - COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	208
	APÊNDICE D - COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	209
	APÊNDICE E - COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	210
	APÊNDICE F - COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	211
	APÊNDICE G - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.	212
	APÊNDICE H - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.	213
	APÊNDICE I - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.	214

APÊNDICE J - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	215
APÊNDICE K - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	215
APÊNDICE L - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	216
APÊNDICE M - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	217
APÊNDICE N - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	218
APÊNDICE O - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	219
APÊNDICE P - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	220
APÊNDICE Q - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	220
APÊNDICE R - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.....	221
APÊNDICE S – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	222

APÊNDICE T – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 E LP2 (PRIMEIRA CAMPANHA).....	223
APÊNDICE U – RESULTADO DO MMQ-MODELO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).....	223
APÊNDICE V – RESULTADO DO MMQ-MODELO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA).....	224
APÊNDICE W – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA)	224
APÊNDICE X – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 E LP2 (PRIMEIRA CAMPANHA)	225
APÊNDICE Y – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA) ...	225
APÊNDICE Z – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA)	225
APÊNDICE AA – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA)	226
APÊNDICE AB– COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA)	226
APÊNDICE AC – COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA)	227

APÊNDICE AD – COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA)	228
APÊNDICE AE – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA)	228
APÊNDICE AF – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA)	229
APÊNDICE AG – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA)	229
APÊNDICE AH – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA SEGUNDA CAMPANHA	230
APÊNDICE AI – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	230
APÊNDICE AJ – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	231
APÊNDICE AK – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA SEGUNDA CAMPANHA.	231
APÊNDICE AL – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	232
APÊNDICE AM – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA SEGUNDA CAMPANHA.	232

APÊNDICE AN – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4 DA SEGUNDA CAMPANHA.	232
APÊNDICE AO – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP5 DA SEGUNDA CAMPANHA	233
APÊNDICE AP – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP6 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	233
APÊNDICE AQ – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA SEGUNDA CAMPANHA	233
APÊNDICE AR– MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	234
APÊNDICE AS – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	234
APÊNDICE AT – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	234
APÊNDICE AU – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP5 DA SEGUNDA CAMPANHA	235
APÊNDICE AV – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP6 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	235
APÊNDICE AW – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA SEGUNDA CAMPANHA	235

APÊNDICE AX – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	236
APÊNDICE AY – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA SEGUNDA CAMPANHA.....	236
APÊNDICE AZ – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA)	237
APÊNDICE BA – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA).....	237
APÊNDICE BB – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).....	237
APÊNDICE BC – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).....	238
APÊNDICE BD – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA)	238
APÊNDICE BE – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA)	238
APÊNDICE BF – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA)	239

APÊNDICE BG – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3(SEGUNDA CAMPANHA)	239
APÊNDICE BH – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA)	240
APÊNDICE BI – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3.....	240
APÊNDICE BJ – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3.....	241
APÊNDICE BK – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3.....	242
APÊNDICE BL – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3.....	242
APÊNDICE BM – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6.....	242
APÊNDICE BN – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6.....	243
ANEXO A – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO RECF - RECIFE	244
ANEXO B – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO PBJP – JOÃO PESSOA	247
ANEXO C – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO PBCG – CAMPINA GRANDE	249

1 INTRODUÇÃO

As características apresentadas pela sociedade denotam de uma elevada sujeição ao consumo de energia elétrica para suas necessidades. A maneira como são produzidos esta energia está tornando-se cada vez mais severa devido à sustentabilidade ambiental e responsabilidade social. As fontes alternativas limpas e renováveis de energia têm despertado especial interesse em diversas áreas de pesquisa.

Devido a esse contexto, houve no mercado de energia eólica um crescimento mundial de sua capacidade instalada nos últimos anos, tornando-se frequente como um elemento da paisagem terrestre. O rápido desenvolvimento e a evolução tecnológica tem forçado a necessidade de torres ainda mais elevadas e agrupadas em parques eólicos para ampliar a capacidade de produção de energia.

No Brasil, o crescimento exponencial da energia eólica é favorecido pelas pressões socioambientais em torno dos empreendimentos decorrentes da implantação de usinas Hidrelétricas, Termoelétricas e Nucleares e seu impacto sobre o meio biótico, socioeconômico e físico. Segundo o relatório da *Global Wind Energy Council - GWEC* (2018), o Brasil ocupa a 8ª posição no *ranking* mundial de capacidade instalada e o 1º lugar na América Latina,

Conforme a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica (2017), a energia eólica é responsável por 8,1% de geração de energia elétrica do Brasil, sendo a região Nordeste responsável pela maior geração e representatividade da fonte eólica.

A geração de energia eólica através de turbinas é uma das maneiras mais eficazes de explorar a energia da Terra por meio da transformação da energia cinética inclusa nas massas de ar em movimento. Geralmente é transformada em energia elétrica através da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com a utilização de modernos geradores eólicos, também conhecidos como aerogeradores.

A torre eólica é composta por nacelle, as pás, o cubo do rotor e a torre. A nacelle consiste em um compartimento instalado no alto da torre, onde abrigam todos os componentes essenciais para a produção de energia, as pás são responsáveis por captar o vento, convertendo sua potência ao centro do rotor, o cubo do rotor é responsável pela fixação das pás e a torre sustenta os componentes descritos. A

fundação pode ser caracterizada como uma parte importante para a torre eólica, sendo responsável por sua fixação e dimensionada de acordo com a altura da torre e as cargas atuantes.

Muitas vezes essas estruturas operam em ambientes adversos. Portanto, elas podem ser danificadas por diversos fatores ambientais e sujeitas a cargas estáticas e dinâmicas, que resultam no deslocamento de elementos individuais e de toda a estrutura. As estruturas que apresentam deslocamentos significativos podem resultar em mudanças permanentes e precisam de inspeções periódicas de sua condição geométrica de funcionamento. A necessidade de tais averiguações está relacionada aos requisitos de segurança, onde a perturbação da geometria pode resultar em consequências inoportunas e catastróficas.

O crescimento dos acidentes envolvendo torres eólicas tem sido relatado por décadas. Uma documentação extensa de acidentes é fornecida pelo fórum do Parque Eólico Caithness (2018). Os números de acidentes registrados refletem uma média de 33 acidentes, de 1998 a 2002, 81 acidentes, de 2003 a 2007, 144 acidentes a partir de 2008 a 2012, e 167 acidentes de 2013 a 2017. A tendência é esperada, mas acidentes acontecem em razão do aumento de torres eólicas instaladas.

Sem um planejamento adequado de monitoramento os números de acidentes tendem a aumentar. Com a falta de acompanhamento e o controle geométrico do comportamento destas estruturas, verifica-se a necessidade de aplicar metodologias para o monitoramento da verticalização e estabilidade. O monitoramento de estruturas e objetos naturais em relação a movimentos e deformações é uma das principais tarefas da Engenharia Geodésica. Através dos métodos geodésicos podem ser avaliadas estas possíveis modificações posicionais por se tratar de uma metodologia empregada para identificar movimentos absolutos e/ou relativos, enquanto os métodos geotécnicos são normalmente empregados para identificar possíveis movimentos relativos.

Em consequência deste considerável crescimento no número de torres eólicas, necessita-se de pesquisas envolvendo levantamento, locação e monitoramento destas torres, com o propósito de determinar a posição de elementos estruturais das torres eólicas, possibilitando também a análise multitemporal dos deslocamentos e/ou deformidades.

Devido à escassez de um material prático, a partir de estudos de casos reais e teóricos referentes à metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas

onshore, essa dissertação responde quesitos referentes a geometria dos pontos de referência do Sistema de Referência de Medição, determinação dos pontos-objeto, definição de sistema de coordenadas e métodos de levantamento geodésicos e topográficos aplicáveis para a realização do monitoramento da verticalização e estabilidade de torres eólicas *onshore*.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A constituição da pesquisa, quanto aos aspectos metodológicos, são apresentados de forma ampla nos objetivos gerais (cf. item 1.1.1) e descritos detalhadamente nos objetivos específicos (cf. item 1.1.2).

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é desenvolver uma metodologia para o monitoramento geodésico em torres eólicas *onshore*, através dos métodos de levantamentos geodésicos/topográficos, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para o ajustamento das observações.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar e analisar os equipamentos empregados e respectivos métodos geodésicos/topográficos para a avaliação da verticalização e estabilidade de torres eólicas (Metodologia Instrumental);
- Materializar estruturas geodésicas para a realização do monitoramento geodésico em torre eólica *onshore*;
- Ajustar os dados pelo Método dos Mínimos Quadrados e analisar a propagação dos erros e qualidades alcançadas;
- Realizar o monitoramento de componentes da torre eólica durante duas campanhas de medição.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi estruturada em seis capítulos com o intuito de atender aos objetivos propostos.

Capítulo 1 – Apresenta na introdução a contextualização sobre o tema, assim como a proposição dos objetivos pretendidos com a metodologia desenvolvida.

Capítulo 2 – Monitoramento geodésico em torres eólicas *onshore*. Aborda informações referentes as principais componentes de uma torre eólica e uma breve análise sobre deslocamento e/ou deformações e esforços atuantes na estrutura. Apresenta pesquisas mundiais empreendidas nos métodos, técnicas e tecnologias de monitoramento em torres eólicas e seus componentes. Considerações teóricas sobre a verificação instrumental, definição e levantamento de um Sistema de Referência de Medição estável, determinação e métodos de levantamentos dos pontos-objeto e a fundamentação e definição do ajustamento, análise e controle de qualidade.

Capítulo 3 – Experimentos e análises metodológicas. Aborda o desenvolvimento da dissertação, apresenta o passo a passo dos procedimentos realizados na verificação instrumental, implantação dos pontos de referência, definição do sistema de referência e os procedimentos para a determinação dos pontos-objeto e monitoramento da torre eólica.

Capítulo 4 – Resultados do controle e monitoramento. Apresenta os resultados e análises da primeira e a segunda campanha de medições.

Capítulo 5– Conclusões e recomendações. Neste capítulo São apresentadas as conclusões e recomendações decorrentes da pesquisa realizada.

Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas, apêndices e anexos.

2 MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES EÓLICAS ONSHORE

Para prevenir falhas ou desastres, as observações relacionadas ao monitoramento em estruturas específicas devem ser realizadas através da implementação de técnicas de medição geodésicas a partir de um cronograma definido oriundo de diferentes épocas.

Ao decorrer da construção das torres eólicas e em seguida na sua manutenção requer atenção especial para a durabilidade da estrutura. Os métodos geodésicos oferecem soluções para a montagem e acompanhamento dessas estruturas. Na realização do monitoramento é inevitável a definição e materialização de estruturas geodésicas e/ou topográficas planialtimétricas de alta acurácia, favorecendo um acréscimo nas pesquisas dos variados métodos geodésicos/topográficos e seus específicos instrumentos.

Para o monitoramento das torres eólicas foram realizadas a utilização de múltiplas técnicas e metodologias de medição (cf. item 2.6) e (cf. item 2.7). O planejamento carece de estudo, pesquisa e adequação onde deve ser definido através de uma metodologia de medição apropriada de acordo com as propriedades desta estrutura, para obter dados com precisão e acurácia desejada, o período de tempo das medições, a gestão das campanhas de medições, custos, dentre outros.

2.1 ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO EM TORRES EÓLICAS

As diversas formas de estruturas de aço para a confecção das torres são submetidas aos variados agentes internos e externos que propiciam mau funcionamento por desgaste, seja por métodos construtivos incorretos, ações ambientais, desgaste gradual, dentre outros. Para o monitoramento das particularidades e propriedades geométricas dessas estruturas é necessário a implementação de ações mais eficientes para identificar avarias no comportamento estrutural em tempo hábil.

Segundo Netto et al (2002), a transmissão destes esforços se faz através da estrutura, alterando a posição relativa de suas moléculas, gerando um deslocamento. Os procedimentos gerais para monitoramento de uma estrutura envolvem a medida de deslocamentos espaciais, a partir de pontos de referência, que têm suas posições controladas (DEPARTMENT OF THE ARMY, 1994).

A produção de energia através de turbinas de energia eólica é um mercado em rápido crescimento. A Tabela 1 mostra a capacidade instalada no Brasil em 2017.

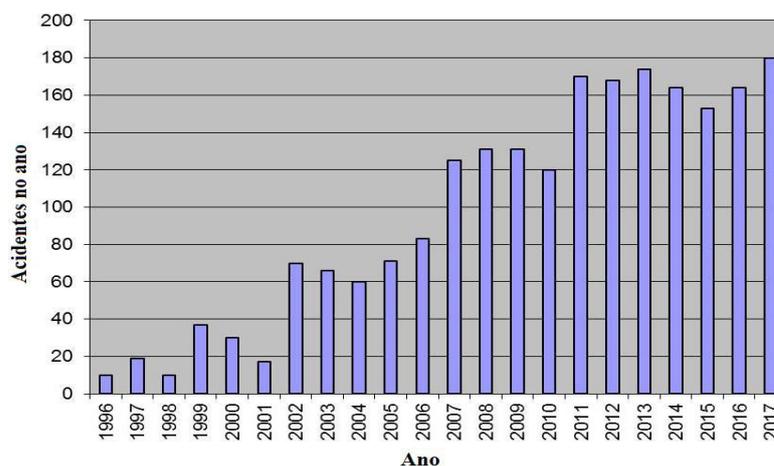
Tabela 1 - Capacidade instalada em 2017.

UF	Potência (MW)	Número de Parques
PI	528,20	19
BA	517,10	20
RN	259,30	10
MA	220,80	08
CE	147,00	06
PE	131,10	05
RS	129,00	08
PB	94,50	03
Total Geral	2027,00	79

Fonte - ABEEólica (2017)

Devido ao fato de que um grande número de turbinas de energia eólica tenham sido construídas, as técnicas de monitoramento são necessárias para garantir a estabilidade e longevidade desses objetos (HESSE, HORST e NEUNER, 2006). As pesquisas mundiais empreendidas nos métodos, técnicas e tecnologias de monitoramento em torres eólicas e seus componentes são poucas, comparadas ao crescimento da capacidade de geração eólica. A Figura 1 reflete o número de acidentes registrados no período entre 1996 a 2017.

Figura 1 - Resumo dos acidentes mundiais com torres eólicas.



Fonte: Parque Eólico Caithness (2018).

A Geodésia e a Fotogrametria são ciências importantes na aquisição de dados. A Geodésia é definida como a ciência que tem por objetivo determinar a forma e as dimensões da Terra, bem como os parâmetros definidores de seu campo da gravidade e suas variações temporais (TORGE, 2001). A Geodésia, além da matemática aplicada, é um ramo da Engenharia e Geociências. A Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de se obterem informações confiáveis de objetos físicos e do meio ambiente, utilizando processos de captura, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões da energia eletromagnética radiante e outros fenômenos (SLAMA, 1980).

Avanços na fotogrametria e correlação de imagens permitiram novas oportunidades para o monitoramento. O principal benefício do uso de fotogrametria é a possibilidade de monitorar o deslocamento da completa superfície ao invés de apenas alguns locais discretos. A primeira tentativa de aplicar a técnica de fotogrametria em uma torre eólica foi feita por Corten e Sabel (1996). Os autores realizaram medições de vibração das pás eólicas enquanto a turbina estava em operação. Para este propósito, eles colocaram vários marcadores nas lâminas e na torre. Os autores também relataram que a fotogrametria seria um método muito promissor para monitorar a dinâmica da turbina eólica com o avanço tecnológico de *hardware e software*.

Ozbek et al. (2010) fizeram um trabalho semelhante ao de Corten e Sabel (1996) com o emprego de equipamentos mais avançados. Esses eram semelhantes no uso de marcadores reflexivos e no método de pós-processamento de imagens. O trabalho consistia em monitorar o comportamento dinâmico da turbina eólica em operação de uma torre eólica com 80 metros, por um sistema composto por quatro câmeras CCD (*Charge Coupled Device*), continuamente, durante todo o período de medição.

No meio destas pesquisas são salientes a modificação de métodos devido o avanço tecnológico, sendo a utilização de LASER scanners com maior frequência em comparativo com os métodos fotogramétricos convencionais. Em ênfase para Grosse-Schwiep, Piechel e Luhmann (2013), os quais utilizaram LASER scanners e câmeras síncronas em diferentes posições para determinar deformações, com o foco principal em torção da lâmina e deflexão em diferentes posições ao longo das pás do rotor.

Pimentel (2012) aponta que os métodos de monitoramento geodésico visam encontrar alterações de coordenadas (planimétricas e/ou altimétricas), de uma série

de leituras, de pontos, em determinado período. Os valores encontrados indicam se houveram alterações nos valores das coordenadas. As técnicas geodésicas com a finalidade de monitoramento devem ser realizadas tanto horizontal quanto verticalmente, com o objetivo de determinar as coordenadas modificadas.

Para a realização do monitoramento é necessário o planejamento de uma rede geodésica conforme a exigência e precisão específica para monitorar uma estrutura eólica. De Seixas e Burity (2005) e Krelling (2006) informam que para a determinação de uma rede de monitoramento, como sistema de referência, para o controle geométrico do objeto de prova são necessários os conhecimentos da grandeza dos deslocamentos e condição para estabelecimento dos equipamentos utilizados e suas respectivas precisões e concepção da melhor configuração das estações de controle de observação.

As pesquisas envolvendo o uso de métodos geodésicos em torres eólicas são poucas. Pode-se destacar os trabalhos de Rezo, Branimir e Slavica (2016) e Dragomir, Negrilă e Sărăcin (2014). Rezo, Branimir e Slavica (2016), utilizaram trabalhos geodésicos durante a preparação da construção do parque eólico, estabelecimento da base geodésica e sistema de coordenadas, levantamento e monitoramento geodésico durante e após a construção, incluindo medidas de deslocamentos e deformações dos objetos.

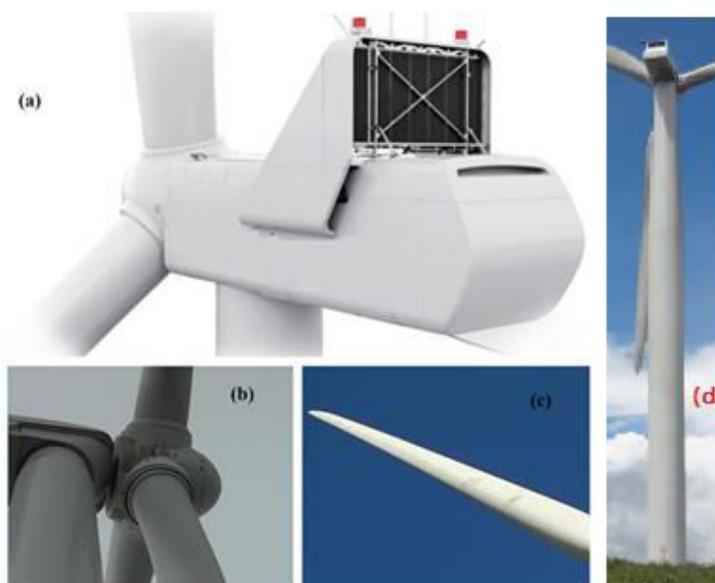
Dragomir, Negrilă e Sărăcin (2014) realizaram o monitoramento da torre eólica essencialmente por métodos geodésicos e fizeram um comparativo com resultados obtidos por tiltímetros eletrônicos, colocados em posições e lugares especiais dispostos radialmente dentro da torre. Os resultados do trabalho comprovaram que o uso dos métodos geodésicos para o monitoramento de torres eólicas adicionam mais informações em comparação com o monitoramento usando sensores, assegurando a necessidade de altas precisões para a determinação de deslocamentos e deformações destas estruturas.

Do ponto de vista nacional, não foram encontradas pesquisas envolvendo monitoramento em torres eólicas, ainda que o país venha apresentando crescimentos que se destacam na América Latina e também no *ranking* mundial em capacidade instalada de energia eólica. Portanto é de substancial importância a pesquisa específica no controle e monitoramento geodésico em torres eólicas

2.2 DESCRIÇÃO DO OBJETO – TORRE EÓLICA

A torre eólica é composta por nacelle, as pás, o cubo do rotor e a torre. Na Figura 2 estão representados esses componentes. A fundação pode ser caracterizada como uma parte importante para a torre eólica. Responsável por sua fixação, esse alicerce sustenta toda a estrutura e necessita de soluções específicas.

Figura 2 – Partes integrante da torre eólica. (a) Nacelle. (b) Cubo do rotor (c) Pá eólica. (d) Torre.



Fonte: O autor (2017).

Nessa dissertação o foco principal é a torre e a base da fundação, mas para que possa haver um entendimento no monitoramento de torres eólicas é preciso conhecer suas partes descritas a seguir.

2.2.1 Nacelle

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao vento (CEPEL/CRESESB, 2008). A Figura 3 mostra os principais componentes instalados na nacelle utilizando um gerador convencional.

Figura 3 – Vista do interior da nacelle de um aerogerador utilizando um gerador convencional.



Fonte: Vestas (2018).

A Nacelle é capaz de mover-se para garantir que sempre se posicione de forma ideal para a direção do vento. Sensores medem o desvio da direção do vento e enviam sinais para o controlador, que em resposta, enviam sinais aos mecanismos de guinada para a orientação correta da turbina e ajuste a posição do rotor para melhor utilização, de forma que ele enfrenta o vento, não importando sua direção (BURTON et al., 2001).

2.2.2 Pás

De acordo com CEPEL/CRESESB (2008), as pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico ao centro do rotor. As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica a frente do aerogerador denominada cubo. A força do vento gira as pás que propulsionam o rotor (elemento que transmite o movimento de rotação para o eixo de movimento). Esta se conecta com o eixo principal que move o gerador.

Conforme Burton et al. (2001), as pás podem ser fixas ou mudar o ângulo. Os aerogeradores que usam controle de velocidade, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar, modificando assim, seu ângulo. Em velocidades de vento elevadas existe um sistema que gira as pás posicionando-as perpendicularmente ao vento, diminuindo a sustentação aerodinâmica e, conseqüentemente, a rotação do rotor.

2.2.3 Cubo do Rotor

O cubo (Figura 4) é encarregado pela Fixação das pás e giram com a força do vento para que haja energia. Além de apresentar os rolamentos para fixação das pás, também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de todas as pás (CEPEL/CRESESB, 2008).

Segundo Viana (2010), o cubo pode estar equipado com um sistema passivo, ativo ou misto. O sistema ativo permite a regulação do ângulo das pás de forma a extrair a máxima potência do vento e também limitá-la para velocidades de vento superiores à nominal. No sistema passivo, as pás da turbina estão fixas relativamente ao cubo do rotor e o misto faz uma associação do sistema passivo e ativo.

Figura 4 – Detalhe de um cubo para fixação das pás.



Fonte: Metálica (2018).

2.2.4 Torre

A Torre é a estrutura de apoio da turbina eólica instalada na altura apropriada ao seu funcionamento. Segundo Matos (2013), as torres que elevam os rotores estão disponíveis em várias opções de construção e podem ser feitas de aço, concreto, e para aerogeradores menores, é possível a utilização de torres de madeira. A figura 5 exemplifica as configurações usuais de torres eólicas.

Figura 5 – Configurações usuais de torres eólicas. (a) Treliçadas de aço. (b) Monopolos de aço. (c) Híbridas de aço-concreto.



Fonte: (a) Brametal (2018). (b) Wind turbine models (2018). (c) Öztürk (2016).

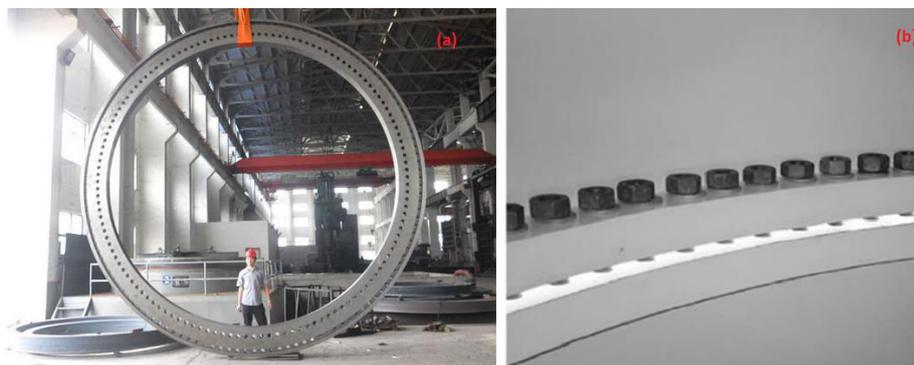
As configurações usadas quase exclusivamente em todo o mundo é uma torre monopolo de aço apoiada em uma fundação de concreto. Estas torres estão geralmente na faixa de altura de cerca de 60-80m (THRESHER et al., 2008).

Conforme a necessidade de aumentar os tamanhos das turbinas, os diâmetros dos rotores e a potência de saída, assim como o requisito de altura da torre. Daí a tendência recente de alturas de torres de cerca de 90 - 120m (FOLSTER, 2016).

Normalmente, as torres monopolo de aço têm um cone sutil da base até o topo, resultando em uma forma semelhante a um cone variando conforme a altura, mas a espessura da parede se mantém constante em cada seção. A vantagem das torres tubulares de aço é o rápido tempo de montagem no local e a redução de custos no tempo de construção (BURTON, et al., 2001).

Nos extremos das seções da torre são soldadas flanges (Figura 6), constituídas em aço de alta resistência e, ocasionalmente, de aço forjado. A modelagem e soldagem dos flanges requer experiência, pois os componentes podem facilmente tornar-se distorcidos, o que conseqüentemente fará com que os flanges não correspondam durante a fase de montagem (DUMBY, 2014).

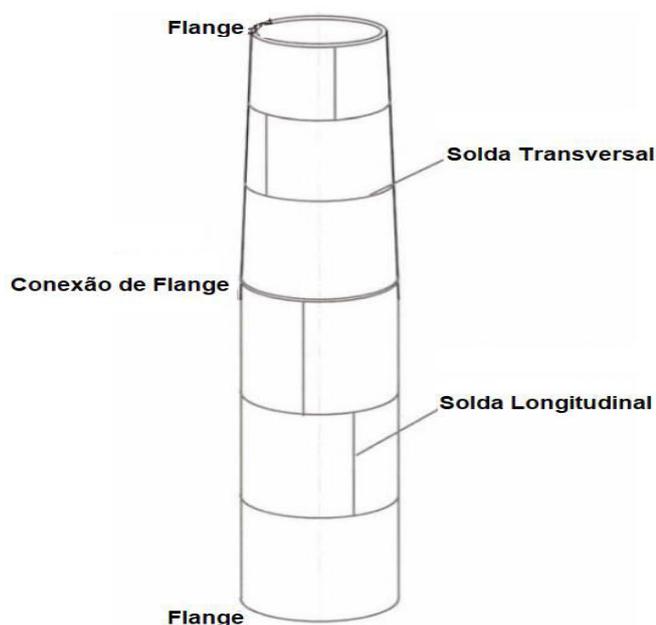
Figura 6 – Flanges. (a) Visão geral. (b) Conexão aparafusada da flange interna da torre eólica.



Fonte: (a) EC21(2012). (b) Hau (2000).

A torre de monopolo de aço é composta de seções de chapa de aço para formar uma grande forma tubular. Esse é o tipo mais comum de torre de turbina no mercado mundial. Placas individuais de aço estrutural formam seções de meio círculo que são soldadas juntas (solda longitudinal) para completar cilindros de seções tipicamente de 2-3m de altura. Estas grandes seções cilíndricas ocas circulares são então unidas com soldas transversais (ST). Vários cilindros se juntam para formar uma seção da torre. A torre termina com um flange de aço que permite aparafusar ao final da próxima seção (FOLSTER, 2016). Isso é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Duas seções de uma típica torre tubular de aço.



Fonte: Adaptado de Engström et al. (2010).

2.2.5 Fundação

A fundação é encarregada em garantir a estabilidade da torre eólica ao longo da sua vida útil. As fundações fazem parte da estrutura de suporte da turbina eólica e são tipicamente construídas com concreto armado. São projetadas em transferir e espalhar as cargas que atuam na fundação no solo. A força vertical que atua sobre a fundação é principalmente a carga da torre e componentes, mas o vento também pode dar origem a alguma força vertical. Devido à grande altura da torre, uma força horizontal do vento exerce um momento de flexão considerável na fundação (SVENSSON, 2010).

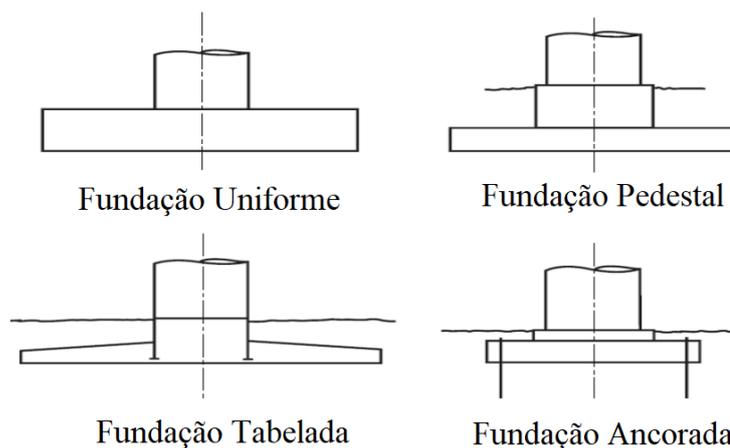
O projeto da fundação leva em consideração as condições normais de operação e cargas extremas impostas pela torre eólica. O diâmetro de projeto da fundação depende em grande parte da natureza do material de suporte, de modo a limitar as pressões de suporte do solo, onde um diâmetro mínimo é necessário para fornecer segurança suficiente contra o capotamento (LOUBSER e JACOBS, 2016).

Existem muitos tipos de métodos de fundação para torres eólicas. De acordo com DNV e RISO (2002), o tipo de fundação necessária dependerá das condições específicas do solo presentes no local escolhido. Os principais tipos de estrutura de fundação para torres instaladas *onshore* são a fundação profunda com uso de estacas ou fundação rasa, através de sapata.

A determinação da escolha do tipo de fundação depende das condições do solo. As fundações rasas somente são escolhidas quando o perfil do solo possuir alta capacidade de suporte ou for encontrada rocha resistente a uma pequena profundidade. Para os casos onde o perfil do solo apresenta baixa capacidade abaixo do bloco de fundação, devem-se adotar soluções com estacas profundas (FARIA e NORONHA, 2005).

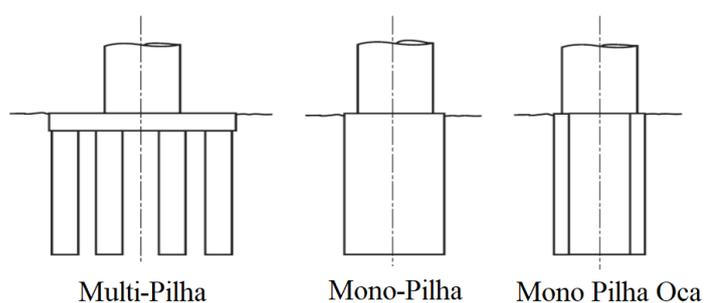
Segundo Burton et al. (2001), a fundação rasa (Figura 8) transmite cargas da superestrutura para o terreno através de sua base. Esse tipo de fundação pode ser a partir de sapata. A fundação profunda (Figura 9) transmite as cargas através da sua superfície lateral, podendo ser constituída por várias estacas, pilha cilíndrica ou apoiada em várias pilhas cilíndricas.

Figura 8 – Variações de fundações rasas.



Fonte: Adaptado de Burton et al. (2001)

Figura 9 – Variações de fundações profundas.



Fonte: Adaptado de Burton et al. (2001).

A precisa execução na construção da fundação assegura sua vida útil. Contudo, deve-se atentar para patologias após o término da obra, uma vez que a estrutura de fundação pode ter sofrido degradação. Portanto, vistorias periódicas devem ser realizadas buscando fissuras e movimentações do solo (BERTUZZI, 2013).

2.3 MODELO DINÂMICO DE DEFORMAÇÃO

Conforme Hibbeler (2004), um corpo sofre deformação quando as posições relativas dos seus pontos alteram. O deslocamento de um corpo ocorre quando as posições dos pontos sofrem uma modificação, relativamente a um ponto externo ao corpo, mas permanecem estáveis entre si.

A existência de modificação geométrica de uma estrutura acontece de forma interna ou externa. No caso da geometria externa, ocorre deslocamento da estrutura

como um todo, sofrendo variação na posição e/ou orientação do objeto, podendo ser horizontal ou vertical, podendo envolver apenas uma translação e ou rotação. Cabe salientar que um deslocamento não necessariamente provoca uma deformação (KRELING, 2006).

O acompanhamento da deformação começa com o estabelecimento de redes de monitoramento. A rede de monitoramento para análise de deformação é realizada com o objetivo de medir as mudanças de corpos deformáveis em sua forma, dimensão e posição. O próprio trabalho de implementar uma rede de monitoramento de deformação às vezes é chamado de levantamento de deformação (SILVA, 1997).

De acordo com Silva (1997), normalmente, a deformação é avaliada através da mudança de coordenadas dos pontos. Portanto, um conjunto de pontos estáveis deve estar disponível para ser usado para a definição do *datum*. Caracterizam dois tipos fundamentais de redes geodésicas para a medição de deformidades dentre estruturas de engenharia ou subsidência terrestre por meio de métodos geodésicos:

- Redes geodésicas absolutas onde alguns dos pontos estão fora do corpo deformável servindo como pontos de referência (rede de referência);
- Redes geodésicas relativas onde todos os pontos pesquisados são assumidos como localizados no corpo deformável.

Conforme o mesmo autor, o principal problema da análise de deformação é confirmar a estabilidade dos pontos de referência e identificar os possíveis deslocamentos dos pontos. Uma rede geodésica absoluta pode ter alguns dos seus pontos que provavelmente se moverão ao longo do tempo, sujeitos a movimentos possíveis, por exemplo, por forças de superfície locais, por uma monumentação errada ou por estarem dentro do objeto deformável.

No caso das redes relativas, a análise de deformação é mais complicada porque, além dos possíveis deslocamentos de um único ponto, todos os pontos sofrem movimentos relativos no material do corpo. O principal problema neste caso é identificar o modelo de deformação, ou seja, distinguir, com base em observações geodésicas repetidas, entre as deformações causadas pelas tensões e pelos deslocamentos de ponto único (CHEN, 1983).

Os pontos de rede que não estão sujeitos a movimentos, geralmente estão fora da área de influência da deformação. Esses pontos constituem a rede de referência

ou referência para o ajuste, através do método dos mínimos quadrados e análise de deformação. Os pontos que estão sujeitos a movimentos são geralmente os pontos que estão sendo monitorados e são conhecidos como pontos de objeto (CHEN, 1983; SILVA, SEIXAS e ROMÃO, 2004; SEIXAS e BURITY, 2005).

Assim sendo, a rede de monitoramento relativo permitirá a detecção de tensão derivada de deslocamentos relativos, rotação diferencial e movimentos relativos do corpo rígido, enquanto a rede absoluta pode detectar movimentos absolutos de pontos de objeto em relação aos pontos de referência estáveis, além do que pode ser detectado em redes de monitoramento relativo.

A rede relativa, no entanto, tem todos os seus pontos de rede localizados dentro da área de influência da deformação e todos os pontos da rede estão sujeitos a movimentos sem pontos estáveis a serem usados como referência (CHEN, 1983; SILVA, SEIXAS e ROMÃO, 2004; SEIXAS e BURITY, 2005).

Para uma mais segura detecção de possíveis deslocamentos e geração de uma rede de monitoramento. Krelling (2006), afirma que, se comparado com outros tipos de levantamentos, as medidas de deslocamento têm as seguintes características:

- Especificação: conhecimento *a priori* da grandeza dos deslocamentos, também uma condição para estabelecer a precisão dos equipamentos utilizados;
- Concepção: atingir a melhor configuração das estações de controle de observação;
- Implantação: técnicas de medição e problemas tais como centragem do instrumento, pontaria aos alvos e nivelamento dos equipamentos;
- Análise: etapa na qual as observações são estatisticamente analisadas; nesta etapa, a análise estatística consiste na detecção de erros grosseiros, estimação de parâmetros e comparação entre conjuntos de dados provenientes de épocas diferentes.

Através de uma cadeia de pontos levantadas por métodos geodésicos e/ou topográficos planialtimétricos de alta acurácia, onde conforme Silva, Seixas e Romão (2004), as estruturas geodésicas nesta dissertação rede é constituída por pontos de referência e pontos-objeto, onde estes pontos deram a referência de medição para monitorar no entorno, enquanto os pontos-objeto sobre a torre eólica a ser monitorada.

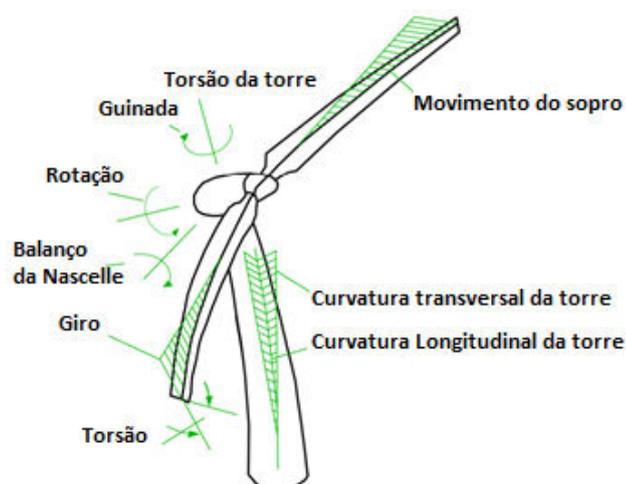
2.4 ESTÁTICA NAS ESTRUTURAS EÓLICAS

Uma determinada estrutura possui características técnicas distintas em diferentes épocas, graças à alternância das cargas atuantes que mudam com o tempo. Conseqüentemente essas estruturas estão sujeitas a deformação e deslocamento devido a esses esforços atuantes

A ação de esforços atuantes nas estruturas, na maioria das vezes, é proveniente do peso próprio, variações de temperatura, cargas ativas (estáticas e móveis), reações de apoio (reativas) e outras. De acordo com Widerski e Kurałowicz (2009), inúmeros esforços, como forças horizontais, resistência do rotor, forças torsionais da própria torre à força do vento, dentre outros, geram vibrações e causam um desequilíbrio funcional da turbina e fluxos de ar. Conforme os mesmos autores, as cargas de excitação do turbilhão em torres resultam em deslocamentos e esforços significativos (dobra, torção, espalhamento e aperto) em seu eixo. As forças transversais causadas pelos ventos são dinâmicas, os valores transversais mudam dinamicamente em intervalos curtos. Eles causam o perigo mais grave para segmentos de torres, juntas soldadas, aberturas, dentre outros.

Na Figura 10 estão representados os graus de liberdade referentes de força atuantes em uma torre eólica.

Figura 10 – Graus de liberdade em uma torre eólica.

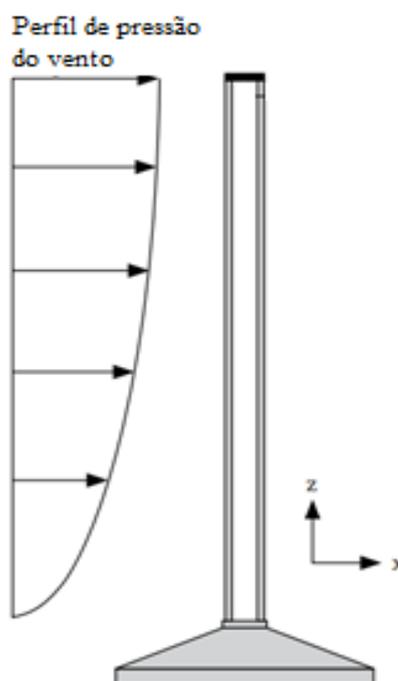


Fonte: Adaptado de Hau (2000).

Dentre estes esforços mencionados, deve-se considerar o vento natural como um dos carregamentos mais importantes para a verificação das torres eólicas em aço.

A ação do vento na estrutura gera momentos que tendem a tombar a torre, gerando esforços de tração nas fundações. De acordo com Siqueira (2008), o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média, designada por rajadas. As cargas do vento em uma torre eólica são resumidas na Figura 11.

Figura 11 – Carga do vento atuando em uma torre eólica.



Fonte: Adaptado de Way e Zijl (2015).

As torres estão sujeitas principalmente a ações cíclicas, geradas pelo vento e pelo funcionamento da turbina, que podem causar vibrações indesejáveis, levar à sua ruptura por fadiga e falhas nos componentes mecânicos, ou por instabilidade da casca metálica em virtude da minimização da sua espessura (DUMBY, 2014).

Devido a estas forças regidas sobre as estruturas de aço, propiciam mau funcionamento por desgaste, seja por métodos construtivos incorretos, ações ambientais, desgaste gradual, dentre outros. Para o monitoramento das particularidades e propriedades geométricas dessas estruturas é necessário a implementação de ações mais eficientes para identificar avarias no comportamento estrutural em tempo hábil.

2.5 DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA

De acordo com Brandão (1996), o conjunto de pontos interligado aos quais, a cada um deles pode-se associar uma posição num dado sistema de referência é denominado campo de pontos (ou rede). As posições desses pontos, definida por suas coordenadas, são determinadas através de relações geométricas. A localização e densificação dos pontos são definidas pelas condições específicas a que este campo se destina, pode ser concebido como sendo uni, bi ou tridimensional. Em um campo tridimensional as posições dos pontos estão referenciadas a um sistema cartesiano de coordenadas tri-ortogonais, devidamente orientados.

Segundo Silva, Seixas e Romão (2004), um campo de pontos de referência é o espaço geodésico ou cartesiano formado por um conjunto de pontos de referência devidamente distribuídos, localizado em posições estrategicamente projetadas, considerando os aspectos de medição geométrica das estruturas envolvidas, aspectos físicos de sua monumentalização, aspectos estocásticos no processo de medição e estabilização, definindo um Sistema de Referência de Medição estável.

Ainda em consonância com os mesmos autores, a configuração dos pontos de referência deve ser otimizada para satisfazer a propagação de erros aceitáveis das observações, atendendo ao melhor rendimento de observação dos pontos-objeto ao longo do tempo. São exemplos de monumentalização de pontos de referência:

- Marcos de concreto;
- Pilares;
- *Benchmark's* simples, de boa qualidade geotécnica, para referenciar réguas e miras;
- Pinos instalados em afloramentos rochosos;
- Pinos ligados simplesmente à superfície estável;
- Pinos de superfície semiesférica.

2.5.1 Análise Espacial para o Posicionamento dos Pontos de Referência

No campo da análise de terreno, o objetivo principal é identificar efetivamente características topográficas para uma melhor compreensão da área do levantamento. As relações entre características são, portanto, de particular importância.

Uma área de estudo que examina em conjunto as formas que constituem o modelo atual da superfície é a Topologia. De acordo com Espartel (1987), o objetivo da Topologia é estudar as formas exteriores do terreno e as leis que regem a sua formação. Em Topografia, a aplicação da Topologia é destinada para a representação do relevo em planta, através das curvas de nível e dos pontos cotados. Sua aplicação principal é na representação cartográfica do terreno pelas curvas de nível, que consiste em interseções obtidas por planos equidistantes paralelos com o terreno a representar.

A representação do relevo de um terreno em planta permite visualizar a forma da superfície terrestre, fornecendo com precisão pontos de interesse da área. A Topologia deve contribuir no planejamento para realizar o levantamento no terreno.

Atualmente vem sendo utilizada a representação do relevo através do Modelo Digital do Terreno (MDT). Segundo Felgueiras (2001), este modelo é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. O MDT é obtido a partir de uma amostragem (Conjunto de amostras que representam a variação de um fenômeno) dentro da região de interesse. As amostras são processadas de forma a criar modelos digitais que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa região.

Através do MDT, dentre as diversas análises, há a possibilidade de gerar como mapas de declividade e exposição, mapas de drenagem, mapas de curva de nível e mapas de visibilidade, onde combinado com a planta planimétrica da região, por intermédio dessa técnica é viável a visualização do relevo em perspectiva.

Posteriormente a avaliação sobre a documentação cartográfica disponível, estuda-se a melhor localização dos marcos planimétricos e/ou RRNN (Referências de Nível) e verifica-se se existe intervisibilidade dos marcos planimétricos a serem implantados e suas distâncias na área a ser levantada.

2.5.2 Reconhecimento e Levantamento de Campo

Antes de começar um levantamento, é necessário efetuar um reconhecimento criterioso da área onde será realizado o levantamento. Esse reconhecimento pode ser feito a partir de uma visita no local ou a partir de documentos disponíveis sobre a área, como mapas, fotografias aéreas e imagens obtidas por sensores remotos orbitais.

Realizada a etapa de reconhecimento, deve-se ter condições de definir parâmetros do levantamento, estabelecido por metodologias geodésicas e topográficas, tal que sejam da melhor forma visível e acessível.

De acordo com Silva e Segantine (2015), definem-se os seguintes parâmetros após a realização do reconhecimento de campo:

- Serviços preliminares necessários para o início dos trabalhos de campo;
- Visita preliminar de inspeção;
- Determinação instrumental e suas condições;
- Métodos de medição a serem empregados;
- Composição e qualificação da equipe de campo;
- Material de apoio de campo, tais como, acessórios, piquetes e material de suporte;
- Autorizações para o desenvolvimento do trabalho;
- Planejamento orçamentário;
- Cronograma de atividades.

Conforme Rodrigues et al. (2007), as etapas do levantamento topográfico para definir o melhor local para a materialização dos vértices depende do planejamento, execução e cálculos:

- Planejamento
 - Estabelecimento de especificações de precisão e controle;
 - Análise sobre documentos cartográficos preexistentes;
 - Visita preliminar de inspeção;
 - Determinação de métodos e instrumentos;
 - Seleção dos métodos de cálculo (compensações);
 - Escolha da forma de representação e apresentação.
- Execução
 - Implantação dos pontos necessários;
 - Medições de campo com registro das observações;
 - Possíveis adaptações do projeto não detectadas na fase de planejamento.
- Cálculos
 - Execução final dos cálculos e preparação dos dados para desenho;

- Redação de relatório descrevendo todos os passos seguidos no projeto, bem como resultados obtidos.

Todas estas etapas citadas acima estão previstas também na NBR 13.133 (ABNT, 1994).

2.5.3 Procedimentos de Locação – Método Polar com Estação Total

Conforme Kahmen e Faig (1988), o procedimento em transferir elementos da planta baixa do projeto para o terreno é definido como locação, em que resulta na implantação do projeto geométrico da representação gráfica em escala no terreno em que consiste na marcação dos pontos em campo, que permitirão o início de uma determinada empreitada.

Em outras palavras, a locação é o procedimento oposto ao levantamento. O levantamento em campo consiste na medição de distâncias e ângulos, quando se utiliza estação total, que proporcionarão o cálculo e desenho da superfície levantada, enquanto a locação consiste em implantar os dados processados no terreno.

Segundo Rodrigues et al (2007), os levantamentos de locação dependem da complexidade da forma do terreno, da importância da estrutura e da amplitude da obra. Quatro tipos de trabalhos topográficos se fazem necessários para a locação de obras:

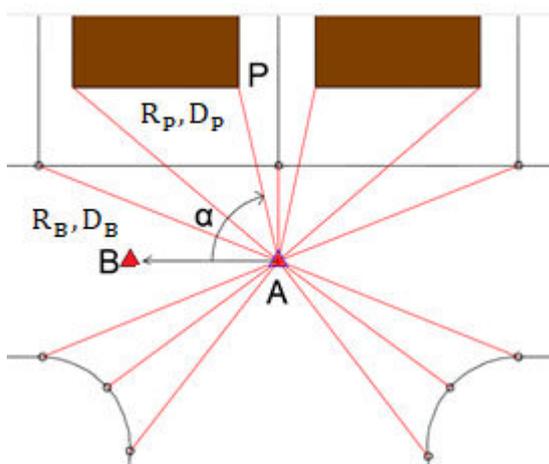
- Levantamento preliminar: Levantamento topográfico da superfície que incluirá a estrutura a ser construída;
- Levantamento para o projeto: Obtenção de dados topográficos exatos para o detalhamento e confecção do projeto;
- Levantamento de controle: Consiste na obtenção e confirmação de dados que permitam a locação da obra com grande precisão;
- Materialização: Determinação dos pontos, em campo, que permitirão o início da construção da obra.

De acordo com Borges (1994), a execução da locação é realizada através do sistema de coordenadas polares ou retangulares, onde as coordenadas cartesianas (ponto em um plano por um par de coordenadas) são melhores para local

alinhamentos e as coordenadas polares (cada ponto em um plano é determinado por distância e ângulo a partir de uma direção de referência) para localizar pontos.

Segundo Kahmen e Faig (1988), o método polar ou método da irradiação é baseado em medidas de direção com base em uma direção de referência fixa mais a distância plana de uma estação conhecida para o ponto-objeto, fornecendo uma definição única de cada ponto. Por meio de ângulos e distâncias, esse método é capaz de conseguir as coordenadas para um ou mais pontos. A Figura 12 ilustra o método polar, onde o instrumento encontra-se no vértice conhecido A e realiza a mediação da distância e direção horizontal do ponto P, a partir da direção de referência no vértice conhecido B.

Figura 12 – Exemplo do método polar.



Fonte: Adaptado de Kahmen e Faig (1988).

Na Figura 12, as coordenadas do ponto P são calculadas a partir das equações 01 a 03:

$$X_P = D_P \text{sen}(Az_{AB} + R_P - R_B) \quad (01)$$

$$Y_P = D_P \text{cos}(Az_{AB} + R_P - R_B) \quad (02)$$

$$\alpha = (R_P - R_B) \quad (03)$$

Em que:

α = Diferença entre as direções medidas;

Direções medidas = R_P, R_B ;

Distância plana medida = D_P ;

Azimute do alinhamento de A para B = Az_{AB} .

2.6 LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA

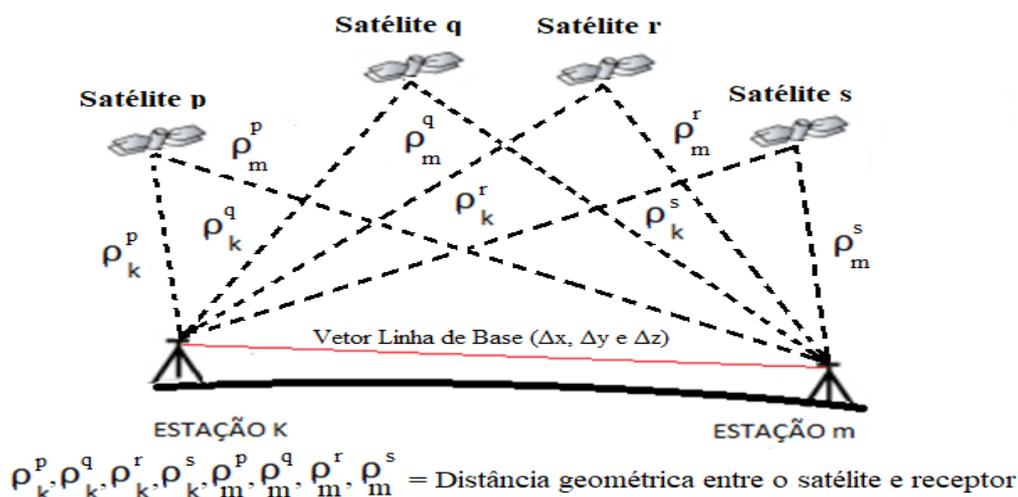
Os pontos de referência devem ser fixados em locais seguros e estáveis. A acurácia de um levantamento está em parte relacionada com a estabilidade dos marcos de referência. Por isso, a monumentalização adequada e a conservação destes pontos são importantes para garantir a qualidade dos dados observados (CARDOSO, 2005).

A seguir serão abordados a definição dos pontos de referência por intermédio do método de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), através do levantamento relativo estático, e levantamentos com estação total, utilizando os métodos de poligonização com centragem forçada, nivelamento geométrico e trigonométrico.

2.6.1 Método de Posicionamento por Satélites Relativo Estático

De acordo com Monico (2008), o posicionamento relativo GNSS é um dos métodos de posicionamento que pode fornecer a posição relativa mais precisa entre um receptor em um ponto conhecido (estação de referência) e um receptor em um ponto desconhecido (estação *rover*). No posicionamento relativo estático (Figura 13), dois ou mais receptores, rastreiam, simultaneamente, os satélites visíveis por um período de tempo, dependendo da distância entre os receptores, determinando a linha de base entre os pontos observados.

Figura 13 – Representação do método de posicionamento por satélites relativo estático.



Fonte: O autor (2017).

Em geral, no método de posicionamento relativo, a posição desconhecida é estimada usando combinações lineares de simples, Dupla Diferença (DD) (Envolvendo dois receptores e dois satélites) (MONICO, 2008).

Devido a existência do Sistema de Controle Ativo (SCA), pode-se utilizar apenas um receptor para realizar o posicionamento relativo, desde que se utilize também dados coletados simultaneamente em uma estação contínua, pertencente a uma rede ativa. No Brasil, a principal rede ativa é materializada pela RBMC (ABREU, 2007). Neste caso, os usuários interessados em realizar levantamentos GNSS relativos não necessitam ocupar as estações de referência, apenas estações a determinar (FORTES, 1997).

2.6.2 Rede Planimétrica

Pode-se definir como rede planimétrica, conforme IBGE (1983) e a ABNT (1994), o conjunto de pontos materializados no terreno (pilares, marcos ou chapas), com o objetivo de estabelecer coordenadas de latitude e longitude (φ , λ) ou cartesiana (X, Y) dos pontos, que serve de base planimétrica ao levantamento topográfico. Estes pontos formam uma figura complexa de lados orientados, hierarquizados.

A Topografia clássica pode ser adotada de forma isolada ou em complemento a trabalhos conduzidos por posicionamento GNSS. As coordenadas da rede planimétrica são determinadas através dos principais métodos clássicos e por GNSS.

Através de equipamentos topográficos tradicionais (estações totais e teodolitos) pode-se estabelecer redes, nas quais os pontos possuem coordenadas com precisão, onde para obter máxima precisão, recomenda-se que as observações sejam realizadas com centragem forçada.

2.6.2.1 Método de Poligonização com Centragem Forçada

Baseado em Erba et al. (2005), pode-se definir uma poligonal como uma sucessão de linhas retas, consecutivas, que se juntam a uma série de pontos, estabelecidos ao longo de uma rota. As retas são unidas por ângulos horizontais, onde os lados do polígono e respectivos ângulos são determinados a partir de medições de campo. Pode-se classificar as poligonais em três tipos:

- Poligonal aberta: Quando parte de um ponto conhecido e chega a outro distinto.
- Poligonal fechada: Começam em um ponto de coordenadas conhecidas ou adotadas e terminam no mesmo ponto, formando um polígono geométrico e analiticamente fechado.
- Apoiada/Enquadrada: Advém de ponto de coordenadas conhecidas e acabam em outro ponto conhecido.

Nesta dissertação foi empregado o método de poligonização para uma poligonal fechada.

A norma ABNT (1994) detalha sobre a existência de cinco classes de poligonais planimétricas, abrangendo aparelhagem, procedimentos, desenvolvimentos e materialização de acordo com suas finalidades:

- Classe IP - Adensamento da rede geodésica (transporte de coordenadas);
- Classe IIP - Apoio topográfico para projetos básicos, executivos, como executado, e obras de engenharia;
- Classe IIIP - Adensamento do apoio topográfico para projetos básicos, executivos, como executado, e obras de engenharia;
- Classe IVP - Adensamento do apoio topográfico para poligonais IIIP. Levantamentos topográficos para estudos de viabilidade em projetos de engenharia;
- Classe VP - Levantamentos topográficos para estudos expeditos.

Uma poligonal pode ser caracterizada por uma sequência encadeada de irradiações (método que a partir de uma linha de referência conhecida, mede-se um ângulo e uma distância), onde se deve obter como resultado final as coordenadas dos vértices.

A centragem forçada é um método que garante a mesma posição com mais precisão, no caso onde haja a necessidade da alternância em um ponto a medir entre o tripé, prisma e instrumento de medição. A base permanece conectada ao tripé até que todas as medições sejam concluídas (KAHMEN; FAIG, 1988).

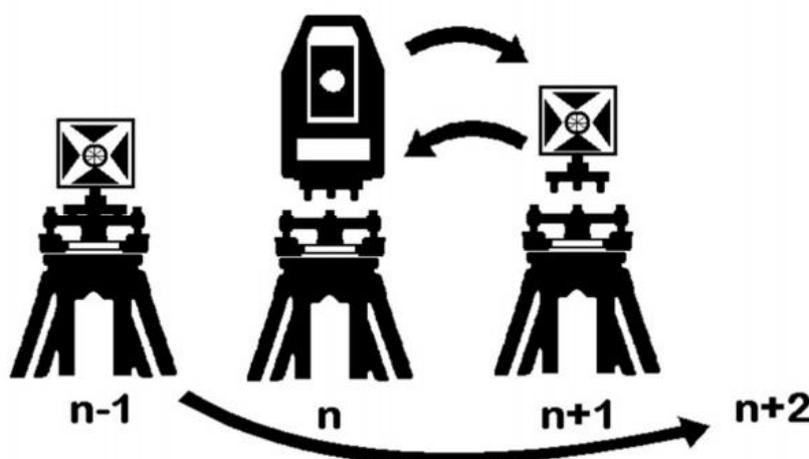
Durante a centragem forçada, dispositivos mecânicos auxiliam o instrumento e alvo a serem trocados de tal forma que seus eixos verticais são forçados a

permanecerem nas mesmas posições, praticamente eliminando os erros de centragem (CARNEIRO, 1993).

O erro posicional é eliminado graças ao uso de vários tripés ao mesmo tempo, pelo menos três, mantendo as três bases nivelantes fixas em todos os momentos, substituindo os prismas e a estação total para fazer as observações.

A Figura 14 exemplifica o método. Seja o instrumento em n e os alvos em vértices de visada ré ($n-1$) e visada vante ($n+1$), são realizadas as medidas dos ângulos e distâncias em $n-1$, retira-se o tripé com o sinal e estaciona no vértice denominado ($n+2$). Após as medidas dos ângulos e distâncias em $n+1$, troca-se apenas o instrumento com o prisma, tornando o vértice $n+1$ como estação do instrumento, o vértice n como o vértice de visada ré e o $n+2$ como vértice de visada vante.

Figura 14 – Esquema representativo da centragem forçada.



Fonte: Arellano (2015).

2.6.3 Rede Altimétrica

Quando as distâncias verticais são referidas à superfície média dos mares, tomam o nome de altitudes; recebem o nome de cotas quando se referem a uma superfície de nível fictícia, situada acima ou abaixo das superfícies dos mares (ESPARTEL, 1987).

O nivelamento é o termo que se aplica a qualquer um dos vários procedimentos que fornece elementos através dos quais as elevações ou diferenças de altitude e a

forma do terreno na direção vertical são determinadas. É uma operação fundamental para a preparação de projetos de obras de engenharia e construções.

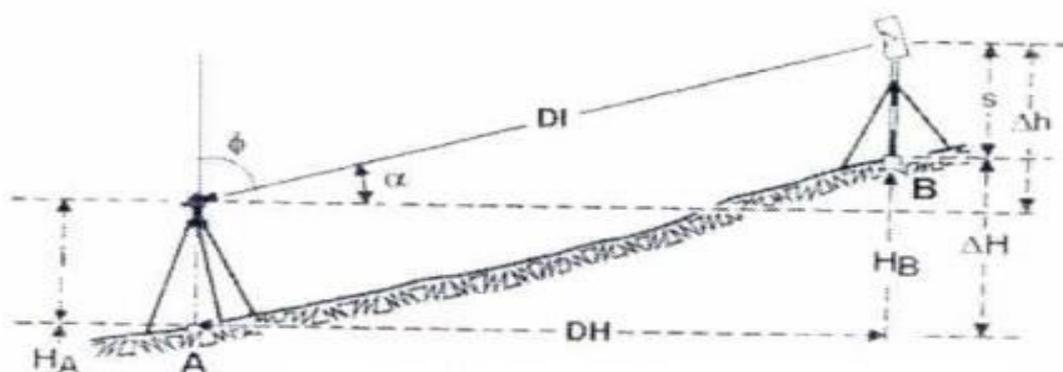
As diferenças de altitudes podem ser determinadas usando diferentes métodos, dependendo do instrumento utilizado, do uso do nivelamento e da precisão necessária. Para a vigente pesquisa serão utilizados os métodos geodésicos, usualmente utilizados no monitoramento de deformações: Nivelamento Geométrico de alta precisão e o Nivelamento Trigonométrico de visadas unilaterais.

2.6.3.1 Método do Nivelamento Trigonométrico de Visadas Unilaterais

Na Topografia, o nivelamento trigonométrico fornece um meio rápido de determinar a irregularidade e as dimensões dos pontos. Kahmen e Faig (1988) comentam que o nivelamento geométrico é o método mais simples e preciso para determinar as diferenças de alturas, mas não pode ser aplicado, por exemplo, para a determinação da altura de uma torre. Para tais casos, a elevação trigonométrica é aplicada.

O nivelamento trigonométrico consiste na determinação da diferença da altura entre dois pontos A e B (Figura 15), através da medição da distância horizontal DH ou inclinada DI e do ângulo vertical zenital ϕ ou ângulo vertical de altura α , observados com auxílio de uma estação total e um prisma, levando em consideração a altura do instrumento ao terreno (i) e a altura sobre o terreno do prisma (s), pode ser executado através de distância curta e longa.

Figura 15 – Nivelamento trigonométrico.



Fonte: Roy (1999).

No entanto, Espartel (1987) adverte sobre a menor precisão do método trigonométrico comparado ao método geométrico, já que o menor dos erros obtidos na medida do ângulo acarreta em um erro na diferença de nível. Será preferível usar sempre a distância zenital (ângulo zenital vertical) em lugar do ângulo de inclinação (ângulo vertical da altura), porque este deverá ser afetado dos sinais mais ou menos segundo a linha de visada achar-se acima ou abaixo da linha do horizonte.

Para o nivelamento trigonométrico com curtas distâncias, as equações para determinação altitudes ou cotas são:

Cálculo de um ponto $B = H_B$, a qual pode ser realizado a partir do cálculo com distância inclinada (Equações 04 e 07) e a partir do cálculo com distância Horizontal (Equações 10 e 11):

$$H_B = H_A + D_{A-B} \operatorname{sen}(\alpha) + (i - s) \quad (04)$$

$$H_B = H_A + D_{A-B} \operatorname{cos}(\phi) + (i - s) \quad (05)$$

$$H_B = H_A + DI_{A-B} \operatorname{Tg}(\alpha) + (i - s) \quad (06)$$

$$H_B = H_A + DI_{A-B} \operatorname{Cotg}(\phi) + (i - s) \quad (07)$$

Em que:

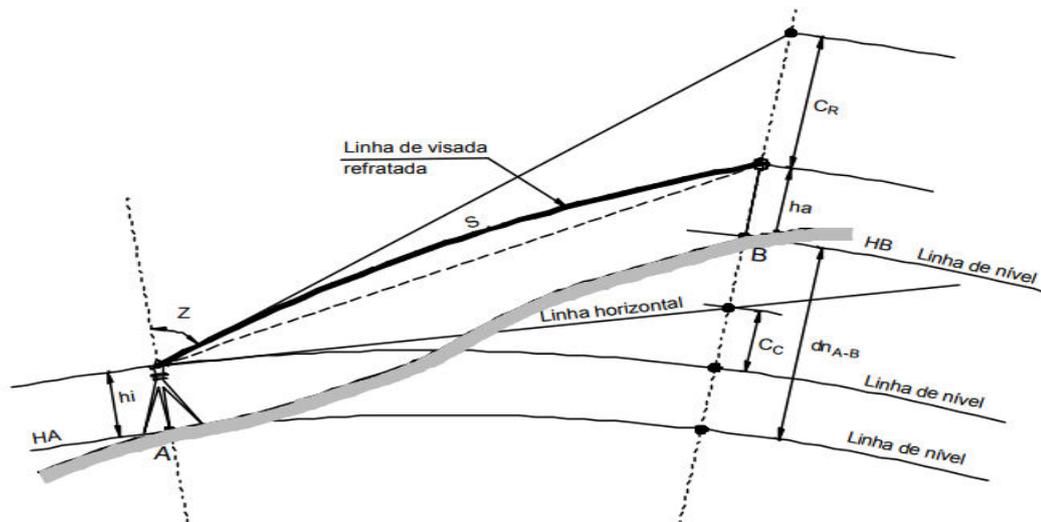
H_A = Altitude ou cota do ponto A;

i = Altura do instrumento;

s = Altura do Prisma.

Conforme Moreira (2003), quando as distâncias entre os pontos são longas, onde se deve considerar a curvatura da Terra e a refração atmosférica devem ser inclusos no modelo matemático. A figura 16 ilustra o nivelamento sobre o ponto conhecido (A) visando o ponto desconhecido (B). A diferença de altitude ou cota, Altitude ou cota do ponto visado, correção da curvatura terrestre e correção da refração atmosférica estão respectivamente nas Equações 08 a 11.

Figura 16 – Nivelamento trigonométrico em longas distâncias.



Fonte: Moreira (2003).

$$dn_{A-B} = S \cos Z + h_i - h_a + C_C - C_R \quad (08)$$

$$H_B = H_A + S \cos Z + h_i - h_a + C_C - C_R \quad (09)$$

$$C_C = S^2 / 2R \quad (10)$$

$$C_R = - \left(S^2 / 2R \right) K \quad (11)$$

Em que:

S = Distância inclinada (m);

Z = Ângulo zenital;

 h_i = Altura do instrumento (m); h_a = Altura do alvo (m); C_C = Correção da curvatura terrestre (m); C_R = Correção da refração atmosférica (m); H_A e H_B = Altitude ou cota dos pontos A e B, respectivamente (m);

R = Raio da Terra (m);

K = Coeficiente de refração (Normalmente igual a 0,13).

2.6.3.2 Método do Nivelamento Geométrico de Alta Precisão

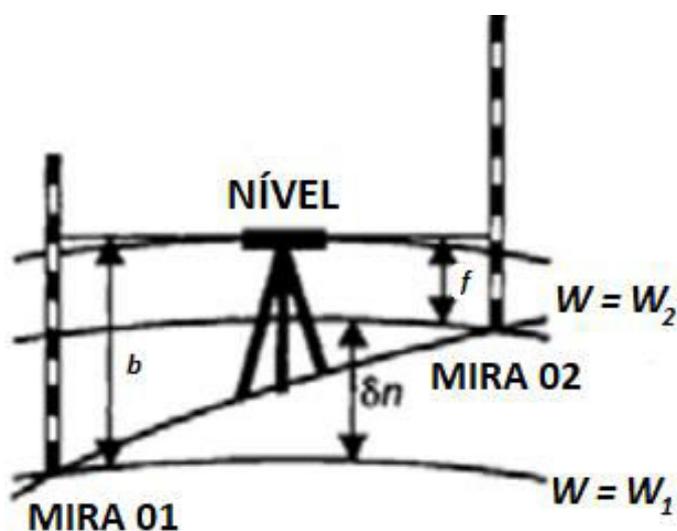
O método de nivelamento mais empregado para trabalhos de engenharia, pois permite conhecer a diferença de nível, entre dois pontos, através da leitura direta das

distâncias verticais. Conforme Espartel (1987), o nivelamento geométrico é o mais preciso dos métodos de nivelamento de campo.

Silva e Segantine (2015) definem que no nivelamento geométrico um plano horizontal de referência é estabelecido por meio de um instrumento denominado nível, determinadas através de visadas horizontais, as diferenças de altura (desníveis) entre pontos próximos uns aos outros. A Figura 17 mostra diferença de nível $\delta\eta$ (Equação 12) entre os dois pontos é dada pela diferença entre a leitura denominada ré (b) e a leitura denominada vante (f) entre pontos que se situam na intersecção da superfície topográfica com as superfícies equipotenciais W_1 e W_2 (TORGE, 2001).

$$\delta\eta = b - f \quad (12)$$

Figura 17 – Princípio do Nivelamento Geométrico.



Fonte: Adptado de Torge (2001).

O nivelamento é realizado em um ponto ou com o instrumento transferido para vários pontos, onde cada um dos quais é feito em lances com leituras ré e vante, que estão ligados entre si por meio de pontos de mudança. O contranivelamento é definido como o método na direção oposta ao nivelamento realizado, ou seja, retornar ao ponto inicial do levantamento a partir do ponto final. Esse procedimento tem como o propósito determinar a diferença total de nível entre as duas operações realizadas (erro de fechamento).

A norma ABNT (1994) recomenda o nivelamento geométrico duplo (nivelamento e contranivelamento) na área a ser levantada em horários distintos, onde

as Referências de Nível do apoio topográfico devem ter as suas altitudes ou cotas assinaladas até a precisão estabelecida pelo equipamento.

Conforme Silva e Segantine (2015), a precisão obtida, a tolerância altimétrica e o erro de fechamento entre o nivelamento e o contranivelamento de um nivelamento geométrico são expressas respectivamente nas Equações 13, 14 e 15.

$$T = 0,0003\sqrt{K} \quad (13)$$

$$E = \sum R - \sum V \quad (14)$$

$$S = \sqrt{\frac{(E)^2}{2k}} \quad (15)$$

Em que:

$\sum R$ = Somatório das leituras de ré em m;

$\sum V$ = Somatório das leituras de vante em m;

E = Erro de fechamento do nivelamento em mm;

K = Perímetro em quilômetros percorrido durante trajeto de nivelamento;

T= Tolerância do erro de fechamento do nivelamento geométrico em mm;

S = Precisão do nivelamento em mm/Km.

A precisão ou erro médio de um nivelamento é relativo ao perímetro percorrido com o nível (em km) e, de acordo com a norma ABNT (1994), a classificação (Tabela 2) dos níveis é apresentada conforme o desvio-padrão de 1 km de duplo nivelamento.

Tabela 2 - Classificação dos Níveis conforme norma ABNT (1994).

CLASSES DE NÍVEIS	DESVIO-PADRÃO
Precisão Baixa	$> \pm 10$ mm/km
Precisão Média	$\leq \pm 10$ mm/km
Precisão Alta	$\leq \pm 3$ mm/km
Precisão Muito Alta	$\leq \pm 1$ mm/km

Fonte: ABNT (1994).

De acordo com Deumlich (1982), a precisão dos níveis pode ser classificado (Tabela 3) baseado em uma linha de 1 km de duplo nivelamento, do modo que:

Tabela 3 - Classificação dos Níveis conforme Deumlich (1982).

CLASSES DE NÍVEIS	DESVIO-PADRÃO
Precisão Baixa	$> \pm 10$ mm/km
Precisão Média	$\leq \pm 10$ mm/km
Precisão Alta	$\leq \pm 3$ mm/km
Precisão Muito Alta	$\leq \pm 1$ mm/km
Precisão Altíssima	$\leq \pm 0,5$ mm/km

Fonte: Deumlich (1982).

Nesta segunda classificação é acrescentada mais uma classe denominada de precisão altíssima, também utilizada na ISO 17123-1 (2001).

2.6.4 Transformação de Coordenadas Tridimensionais Geocêntricas em Coordenadas no Sistema Geodésico Local

Conforme Dal'Forno et al. (2010), o Sistema de Coordenadas Cartesiano Tridimensional Geocêntrica, onde a origem está no centro de massas da Terra, é formado por três eixos perpendiculares sobre o elipsóide de revolução. O sistema é definido pela intersecção do eixo X, coincidente com o plano equatorial e positivo na direção da longitude 0° , e o eixo Y, localizado no plano equatorial e positivo na direção da longitude 90° . O eixo Z é paralelo ao eixo médio de rotação da Terra definido pelo Pólo Convencional Terrestre, e positivo na direção do norte.

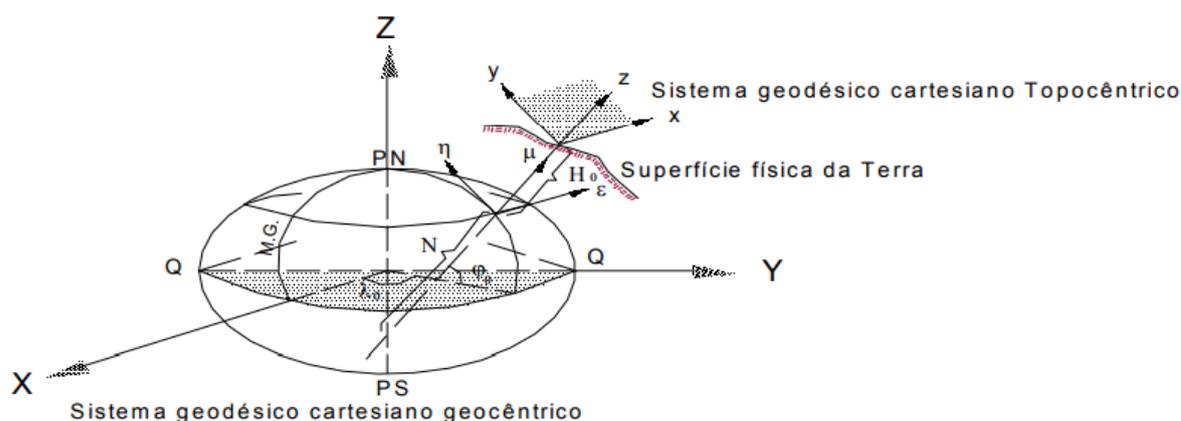
De acordo com Leick (1995) e Dal' Forno et al. (2010), nos projetos de engenharia implantados por trabalhos geodésicos, o uso do Sistema de Coordenadas Terrestres Local, é o que permite operacionalizar com maior exatidão a implantação de obras e de plantas cadastrais. Este sistema tem grande aplicação no desenvolvimento de modelos matemáticos que integram observações GNSS e terrestres.

O Sistema de Coordenadas Terrestres Local ou Sistema Geodésico Topocêntrico, pode ser definido em relação a uma normal ao elipsoide (Sistema Geodésico Local) ou ao vetor de gravidade local (Sistema Astronômico Local). Esse sistema de coordenadas é cartesiano, formado por três eixos reciprocamente ortogonais. Contudo, as direções dos eixos nem sempre seguem a definição

convencional. Em levantamentos, as direções são Norte (N), Leste (E) e normal ou vertical (JEKELI, 2002).

De acordo com Garnés, Siqueira e Cacho (2005), o Sistema Geodésico Topocêntrico é um sistema cartesiano com eixo z coincidente a direção normal ao elipsóide de referência no ponto origem escolhido (φ_0, λ_0) com sentido positivo no zênite, o eixo y com direção coincidente a direção da reta tangente ao meridiano do elipsóide na origem do sistema e orientação positiva para o norte; e o eixo x sendo um terno cartesiano ortogonal com os eixos y e z e direção positiva para o leste. A Figura 18 exibe o Sistema Cartesiano Geocêntrico (X,Y,Z) e o Sistema Geodésico Topocêntrico (x,y,z).

Figura 18 – Sistema geodésico cartesiano topocêntrico.



Fonte: Garnés (1998).

Segundo Garnés (1998), a transformação entre as coordenadas cartesianas no sistema geodésico geocêntrico (X, Y e Z) e as coordenadas cartesianas no sistema geodésico topocêntrico (x, y e z) no ponto origem definido, pode ser expressa matematicamente através da Equação 16.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\operatorname{sen} \varphi_0 \cos \lambda_0 & -\operatorname{sen} \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ \cos \varphi_0 \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \operatorname{sen} \lambda_0 & \operatorname{sen} \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Em que:

X, Y e Z = Coordenadas Geocêntricas do Ponto;

X_0, Y_0 e Z_0 = Coordenadas Geocêntricas do Ponto Origem.

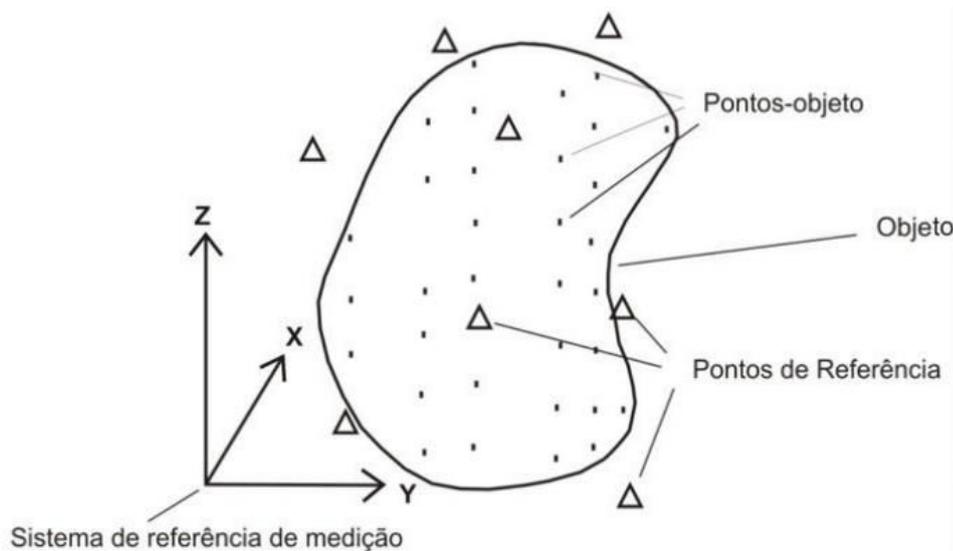
φ_0 = Latitude geodésica do Ponto Origem;

λ_0 = Longitude geodésica do Ponto Origem.

2.7 DEFINIÇÃO DE PONTOS-OBJETO

De acordo com Seixas e Burity (2005), um campo de pontos que discretizam um objeto, localizados devidamente de acordo o modelo do objeto, com o objetivo de particionar um todo em partes com menor complexidade e que auxiliem na medição, é intitulado como campo de pontos-objeto. A Figura 19 ilustra o monitoramento de um campo de pontos-objeto a partir de um campo de pontos de referência.

Figura 19 – Representação do monitoramento de um campo de pontos-objeto.



Fonte: Silva, Seixas e Romão (2004).

Conforme Silva, Seixas e Romão (2004), o campo de pontos-objeto pode ser definido como o espaço geodésico ou cartesiano associado a melhor representação dos aspectos geométricos da superfície que representará o objeto, aos aspectos físicos de sua materialização e aos aspectos estocásticos no processo de medição empregado. A definição dos pontos-objeto e sua materialização é dependente da metodologia de instrumentação temporal utilizada e a posição destes é otimizada de acordo com a forma do objeto e das condições, que favorecem a realização das medições. Os pontos-objeto poderão ser materializados tais como:

- Chapas de metal;
- Marcas luminosas;
- Marcas fosforescentes;
- Pilares;
- Pinos ligados simplesmente à superfície;
- Pinos cravados a diferentes profundidades da superfície;
- Pinos com ranhuras e/ou furos associados a diferentes formas de alvos.

Através da definição das estruturas do campo de pontos de referência podem ser georreferenciados os pontos-objeto, ou seja, o campo de pontos-objeto é monitorado a partir do campo de pontos de referência. A localização dos pontos depois de materializadas pode ser analisada temporalmente para análise de possíveis deslocamentos.

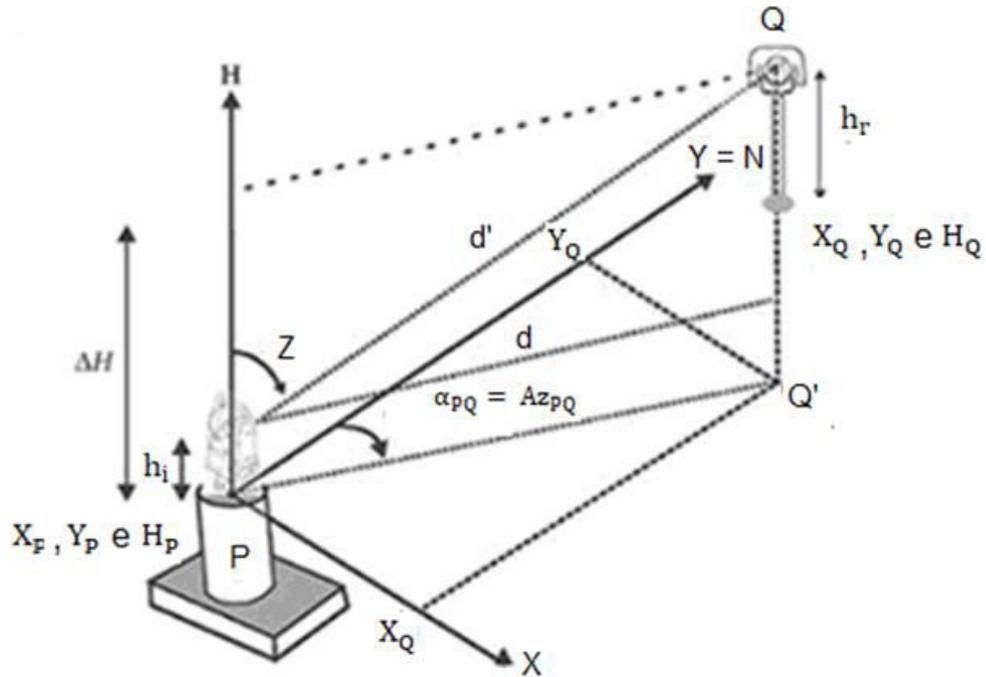
2.8 LEVANTAMENTO DOS PONTOS-OBJETO

Nessa dissertação os principais métodos para a determinação de coordenadas tridimensionais dos pontos-objeto utilizando teodolitos ou estações totais foram o método de irradiação tridimensional, interseção a vante e o método da medição de bordas.

2.8.1 Método da Irradiação Tridimensional

Segundo Silva e Segantine (2015), através do método da irradiação tridimensional é realizado a determinação de coordenadas espaciais baseado na medição de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas em relação a uma direção conhecida, tomada como referência (Figura 20).

Figura 20 – Princípio da irradiação tridimensional.



Fonte: Silva e Segantine (2015).

Em que são dados:

Ponto (P) = P(x_P , y_P , H_P)

$\alpha_{PQ} = Az_{PQ}$

Medidos:

$H_Q = z, h_i, h_r$ e d'

Deve-se calcular:

Coordenadas do Ponto (Q) = Q(x_Q , y_Q , H_Q)

As coordenadas tridimensionais são determinadas a partir das Equações (17), (18) e (19).

$$X_Q = X_P + d' \operatorname{sen}(z) \operatorname{sen}(Az_{PQ}) \quad (17)$$

$$Y_Q = Y_P + d' \operatorname{sen}(z) \cos(Az_{PQ}) \quad (18)$$

$$H_Q = H_P + h_i - h_r + d' \cos(z) \quad (19)$$

Sendo:

X_P, Y_P e H_P = Coordenadas do ponto de origem (P);

X_Q, Y_Q e H_Q = Coordenadas do ponto (Q) a serem calculadas;

h_i = Altura do instrumento;

h_r = Altura do refletor;

d' = Distância inclinada da medida entre os pontos (P) e (Q);

Az_{PQ} = Azimute de alinhamento PQ;

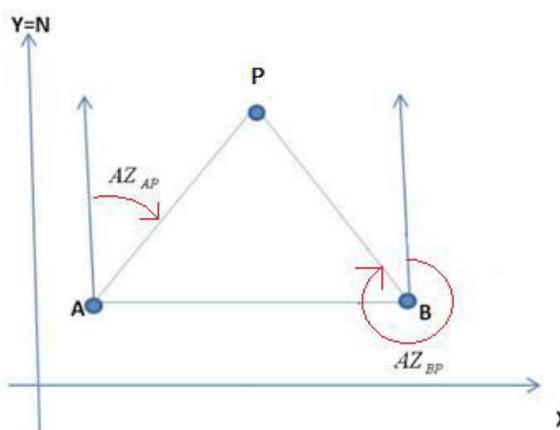
z = Ângulo zenital vertical em (P).

2.8.2 Método da Interseção à Vante

Conforme Kahmen e Faig (1988), o método de interseção à vante é empregado quando se quer determinar as coordenadas do ponto N sobre duas ou mais estações de coordenadas conhecidas de um objeto, sem precisar ocupá-lo.

O ponto-objeto é determinado a partir de dois teodolitos instalados em locais livremente escolhidos. A visualização do mesmo ponto com os teodolitos e determinação dos ângulos horizontais e verticais possibilitam o cálculo das coordenadas (SEIXAS; BURITY, 2005). A Figura 21 mostra esquematicamente o princípio do método, com as observações necessárias à obtenção das coordenadas do ponto P.

Figura 21 – Princípio da interseção à vante.



Fonte: Adaptado de Erba et al. (2005).

De acordo Silva e Segantine (2015), as coordenadas do ponto P podem ser obtidas a partir das Equações 23 e 25 ou Equações 20 e 25:

$$|\operatorname{tg} AZ_{BP}| < |\operatorname{tg} AZ_{AP}| \quad (20)$$

$$Y_P = Y_A + \frac{(X_B - X_A) - (Y_B - Y_A) \operatorname{tg} AZ_{BP}}{\operatorname{tg} AZ_{AP} - \operatorname{tg} AZ_{BP}} \quad (21)$$

$$X_P = X_B + (Y_P - Y_B) \operatorname{tg} AZ_{BP} \quad (22)$$

$$|\operatorname{tg} AZ_{BP}| > |\operatorname{tg} AZ_{AP}| \quad (23)$$

$$Y_P = Y_B + \frac{(X_A - X_B) - (Y_A - Y_B) \operatorname{tg} AZ_{AP}}{\operatorname{tg} AZ_{BP} - \operatorname{tg} AZ_{AP}} \quad (24)$$

$$X_P = X_A + (Y_P - Y_A) \operatorname{tg} AZ_{AP} \quad (25)$$

Sendo que:

X_A, Y_A = Coordenadas do vértice A;

X_B, Y_B = Coordenadas do vértice B;

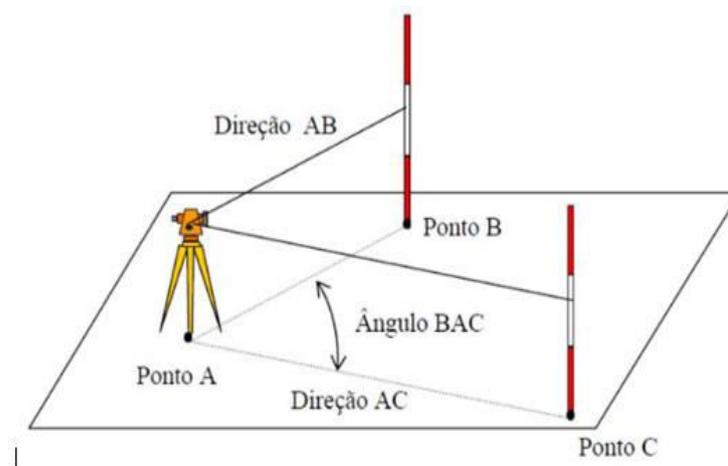
AZ_{AP} = Azimute de alinhamento AP;

AZ_{BP} = Azimute de alinhamento BP;

2.8.3 Método de Medição de Bordas

Conforme Erba et al. (2005), o ângulo horizontal (Figura 22) é definido por um ângulo diedro formado entre dois planos verticais. Ou seja, são medidas direções e a partir destas direções são calculados os ângulos.

Figura 22 - Leitura de direções e cálculo do ângulo.

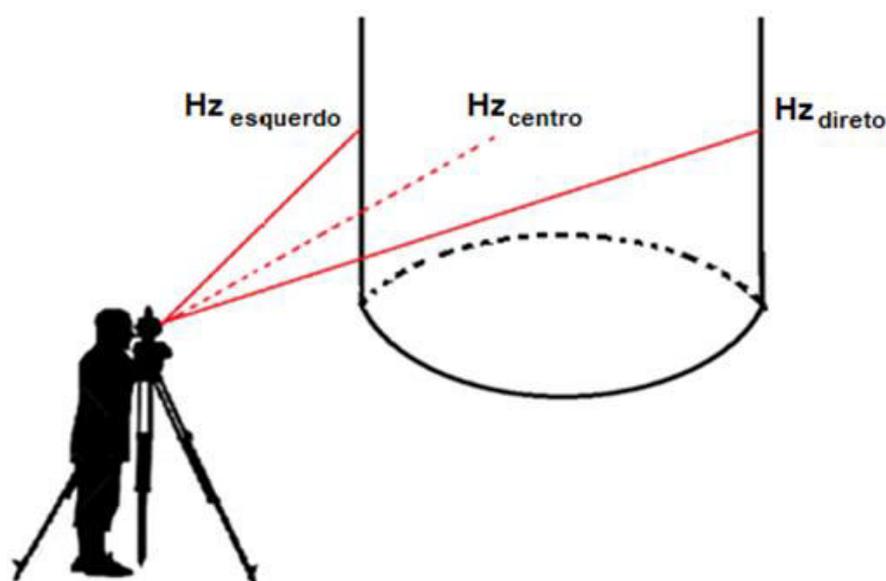


Fonte: Veiga; Zanetti e Faggion (2012).

Este método consiste na determinação da direção horizontal central de uma determinada estrutura, através da definição do valor médio das observações de direções horizontais, a partir da medição de direções horizontais nas bordas da estrutura (Equação 26). A Figura 23 ilustra a determinação da direção horizontal do centro ($HZ_{médio}$) de uma estrutura em formato de um cilindro, a partir da leitura das bordas ($HZ_{esquerdo}$ e $HZ_{direito}$).

$$HZ_{médio} = \frac{HZ_{esquerdo} + HZ_{direito}}{2} \quad (26)$$

Figura 23– Método de medição de bordas para determinar a direção horizontal do centro.



Fonte: O autor (2018).

2.9 VERIFICAÇÃO E RETIFICAÇÃO INSTRUMENTAL

Os erros instrumentais: podem ser causados por falha ou imperfeição física do instrumento de medida. Conforme Nadal (2000), alguns erros instrumentais podem ser tratados isoladamente como erros sistemáticos. Isto só será possível quando puderem ser determinados. Alguns desses erros podem ser minimizados durante o processo de medição, pelos compensadores ou pela medição em posição direta (PD) e posição indireta (PI) da luneta.

Nos levantamentos de campo que buscam alta acuracidade, é essencial que os instrumentos de medição estejam verificados e retificados quando possível,

calibrados e classificados, para que possam alcançar a precisão exigida (SILVA, NADAL e VEIGA, 2007)

De acordo com Zonta (2012), de maneira geral, os erros instrumentais podem ser compensados ou retificados, por meio de modelos matemáticos e através da retificação ou calibração dos equipamentos. A calibração é indispensável antes de iniciar um trabalho de alta precisão, especialmente para reduzir os erros sistemáticos.

Conforme o passar do tempo e variações da temperatura, os erros instrumentais podem ser alterados. Portanto, deve-se realizar a determinação dos erros antes da primeira utilização, de cada levantamento de precisão, após longos períodos de transporte, longos períodos de trabalho e se a alteração de temperatura for superior a 20°C (LEICA, 2006).

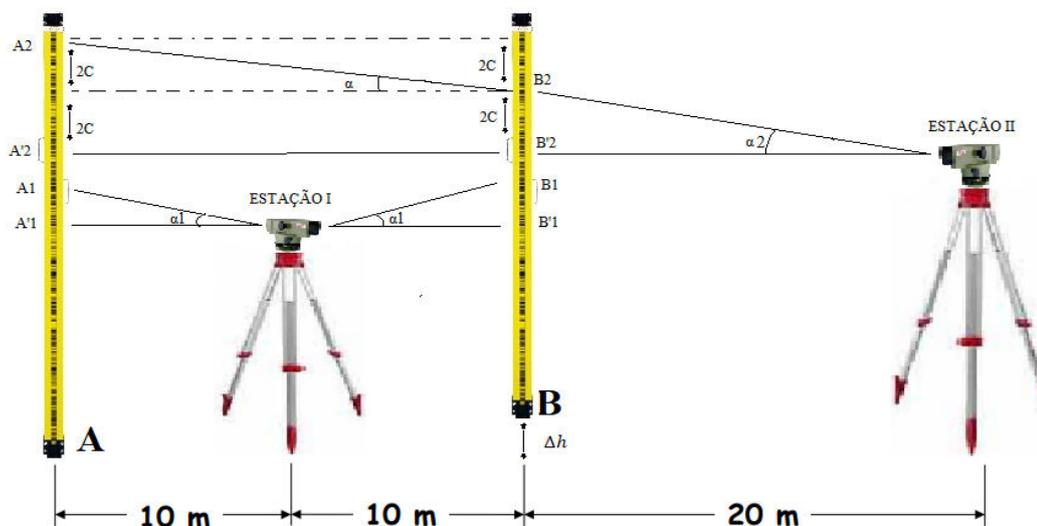
Nessa dissertação foram abordados os procedimentos utilizados para a verificação do nível digital e estações totais utilizados (cf. item 2.9.1) e (cf. item 2.9.2).

2.9.1 Verificação e Retificação de um Nível de Luneta

As fontes de erro em nivelamento podem ser classificadas naquelas que afetam a linha de visada ou de colimação, as leituras na mira e as inerentes à instalação do instrumento. Um nível fornece um plano horizontal através de uma linha de visada perpendicular à direção do vetor gravidade no centro óptico do instrumento. Em consequência de erros sistemáticos no processo de materialização da horizontalidade da linha de visada, sua posição pode não ficar precisamente na horizontal. O ângulo compreendido entre a linha de visada e a horizontal representa o erro de colimação observação. Para lances com mesma distância de visada ré e vante esse erro é cancelado. Como nem sempre é possível obter lances com distâncias de visadas iguais torna-se necessário realizar a correção do erro de colimação antes de ir a campo (BARBOSA, 1996).

Khamen e Faig (1988) descrevem o método de Kukkamäki para a correção do erro de colimação. O teste fundamenta-se no alinhamento por duas estações (I e II), onde a I está posicionada a 10 metros das miras A e B e a II localizada a 40 m de A e 20 m da estação B, de acordo com a Figura 24.

Figura 24 - Método de Kukkamaki.



Fonte: Adaptado de Khamen e Faig (1988).

Na existência de erro, ambas as leituras estarão afetadas do mesmo valor C . Ao subtrair os valores obtidos, o resultado é uma diferença de nível livre de erros. No segundo passo, instala-se o nível a 20 metros de B e 40 m de A, e procede-se com a realização das leituras. As leituras obtidas conterão erros proporcionais à distância da mira, que neste caso a leitura A2 será equivalente a $4C$ e a leitura B2 a $2C$. Com isto, pode-se determinar o valor do erro C conforme as Equações 27 a 30:

$$A_2 = \Delta h + B_2 + 2C = B_2 + A_1 - B_1 + 2C \quad (27)$$

Caso verificado o erro, atua-se nos fios de retículo do aparelho, alterando sua posição de tal maneira até que as leituras sejam alcançadas:

$$A'_2 = A_2 - 4C \quad (28)$$

Em que:

$$B'_2 = B_2 - 2C \quad (29)$$

Após averiguação final, os valores deverão ser obtidos pela Equação 29:

$$A'_2 - B'_2 = A'_1 - B'_1 = \Delta h \quad (30)$$

O erro C é determinado pela Equação 33 a partir das combinações das Equações 31 a 34:

$$a_1 = \Delta h + b_1 \quad (31)$$

$$a_2 = \Delta h + b_2 + 2C \quad (32)$$

$$\Delta h = a_1 - a_2 \quad (33)$$

$$2C = (a_2 - b_2) - (a_1 - b_1) \quad (34)$$

2.9.2 Método de Verificação dos Limbos Horizontal e Vertical da Estação Total

De acordo com Silva, Nadal e Veiga (2007), a classificação angular de um instrumento é realizada a partir de observações realizadas em campo ou laboratório. Assim qualquer problema na graduação do limbo pode influenciar nos resultados. Um método para verificação do limbo é através da implantação de miras em um ambiente, de forma que a mira sejam distribuídas em intervalos conhecidos, de modo a realizar leituras em todas as posições do limbo.

Conforme Medina (1998), os erros de graduação do limbo podem ser regulares ou irregulares, e também podem ser causados por variações de temperatura. Para minimizar os erros são realizadas observações em diferentes partes do limbo, distribuídas de forma adequada.

A precisão deste ângulo será função da precisão nominal angular da estação total. Para uma estação total de 5" ao se efetuar a leitura da direção horizontal em um alvo em posição direta (PD) e invertida (PI), este valor indica que o desvio padrão da média das duas direções será de 5" (Professional Surveyor Magazine, 2002).

Pode-se avaliar o desvio padrão angular através do método das direções. Conforme Moreira Siqueira e Meneghetti (2008), o método consiste nas medições angulares horizontais com visadas das direções nas duas posições de medição direta e inversa do instrumento, a partir de uma direção tomada como origem em diferentes posições de seu limbo horizontal, por uma série de leituras conjugadas sucessiva das direções, a partir da direção-origem. De acordo com o mesmo autor, faz-se o giro de ida na posição direta da luneta e de volta na posição inversa, ou vice-versa, terminando na última direção e iniciando-se, aí, a volta sem fechar o giro. O intervalo, medido no limbo horizontal do instrumento, entre as posições da direção-origem neste limbo, chama-se intervalo de reiteração. Assim, para observação de "n" séries de

leituras conjugadas pelo método das direções, o intervalo de reiteração deve ser $180^\circ/n$.

2.10 AJUSTAMENTO, ANÁLISE E CONTROLE DE QUALIDADE

Conforme Gemael (1994), o ajustamento é um ramo da matemática aplicada, onde o objetivo é obter uma única solução para problemas onde o número de observações é redundante e o sistema de equações inconsistente, e a estimativa da precisão da solução adotada.

Ghilani e Wolf (1997) recomendam a repetição das medidas, devido a presença de erros, para que as medidas sejam ajustadas, com o intuito de aumentar as precisões dos valores finais para as incógnitas.

As medidas possuem uma propriedade intrínseca, conhecida como flutuações probabilísticas, pois, na repetição da medida de uma grandeza, os resultados não são iguais, mas dispersos em uma região ou intervalo. Essas flutuações, tradicionalmente, são classificadas como erros aleatórios e resultam na inconsistência do sistema de equações (GEMAE, 1994).

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é indicado quando houver um número redundante de observações, o princípio do MMQ é ser mínima a soma do quadrado dos resíduos (Equação 35), sendo um método amplamente utilizado nas Ciências Geodésicas.

$$\varphi = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 = V^T V \rightarrow \text{Mínimo} \quad (35)$$

Em que:

v_n^2 = Resíduos;

V = Vetor que contém os resíduos.

Quando n observações forem obtidas com diferentes níveis de confiabilidade torna-se a introdução de uma ponderação necessária, ou seja, um peso (P), conforme a Equação (36).

$$\varphi = v_1^2 p_1 + v_2^2 p_2 + v_3^2 p_3 + \dots + v_n^2 p_n = \sum_{i=1}^n v_i^2 p_i = V^T P V \rightarrow \text{Mínimo} \quad (36)$$

Em que:

p_n = Peso;

P = Vetor que contém os pesos.

O ajustamento pelo MMQ pode ser feito empregando o modelo paramétrico, correlatos ou combinado. No modelo paramétrico as observáveis ajustadas são expressas em função dos parâmetros ajustados. No modelo dos correlatos as observáveis ajustadas estão ligadas por equações de condição. O modelo combinado engloba parâmetros ajustados ligados por uma função não explícita. O modelo dos correlatos não será discutido dissertação. Informações dos métodos paramétrico, combinado e correlatos são descritos em Gemael (1994).

2.10.1 MMQ - Modelo Paramétrico

Com o objetivo de determinar o valor de uma grandeza, pode-se realizar de forma direta sobre esta, ligando-se por equações de condição ou de forma indireta, vinculando às incógnitas através de relações funcionais, conhecidas como parâmetros. Devido as medições terem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição, é necessário ajustá-las juntamente com os parâmetros (quando existem), a um modelo matemático.

Conforme Gemael (1994), nas observações indiretas, deseja-se estimar grandezas que se vinculam às grandezas observadas através de algum modelo matemático. Para distinguir estes dois tipos de grandezas é usual denominar as primeiras, de observações indiretas de parâmetros, o que explica a denominação de modelo paramétrico.

O modelo matemático para o ajustamento pelo modelo paramétrico, no qual os valores observados ajustados são expressos como uma função dos parâmetros ajustados, conforme Equação 37.

$$L_a = F(X_a) \tag{37}$$

Em que:

L_a = Vetor (n x 1) dos valores observados ajustados;

X_a = Vetor (m x 1) dos parâmetros ajustados.

A relação matemática entre as observações e os parâmetros são expressos nas seguintes formulações, nas Equações 38 e 39:

$$L_a = L_b + V \quad (38)$$

Em que:

L_b = Vetor (n x 1) dos valores observados;

V = Vetor (n x 1) de resíduos;

$$X_a = X_0 + X \quad (39)$$

Em que:

X_a = Vetor dos parâmetros ajustados;

X_0 = Vetor (n x 1) com valores aproximados dos parâmetros;

X = Vetor (n x 1) das correções.

Linearizando $F(X_a)$ pela Equação de Taylor, obtém-se a Equação 40:

$$L_a = L_b + V = F(X_a) = F(X_0 + X) = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_0} \right|_{X_a=X_0} \quad (40)$$

Fazendo $L_0 = F(X_0)$, ou seja, chamando de L_0 o vetor (nX1) resultante da aplicação nas funções F dos valores aproximados dos parâmetros X_0 (Parâmetros aproximados), obtém-se a Equação 41.

$$L = L_0 - L_b \quad (41)$$

Obtendo-se assim, o modelo matemático linearizado (Equação 42) do modelo dos parâmetros:

$$V = AX + L \quad (42)$$

Em que:

A = Matriz dos coeficientes.

A solução pelo Método dos Mínimos Quadrados é obtida fazendo-se $V^T P V = \min$ (Equação 43):

$$\varphi = V^T P V = (AX + L)^T P (AX + L) = \min \quad (43)$$

Igualando Equação 42 a zero e a derivada primeira em relação a X , tem-se um sistema de equações denominado sistema de equações normais, onde realizando o rearranjo para obtenção do vetor das correções X , tem-se a Equação 44:

$$X = -(N)^{-1} U \quad (44)$$

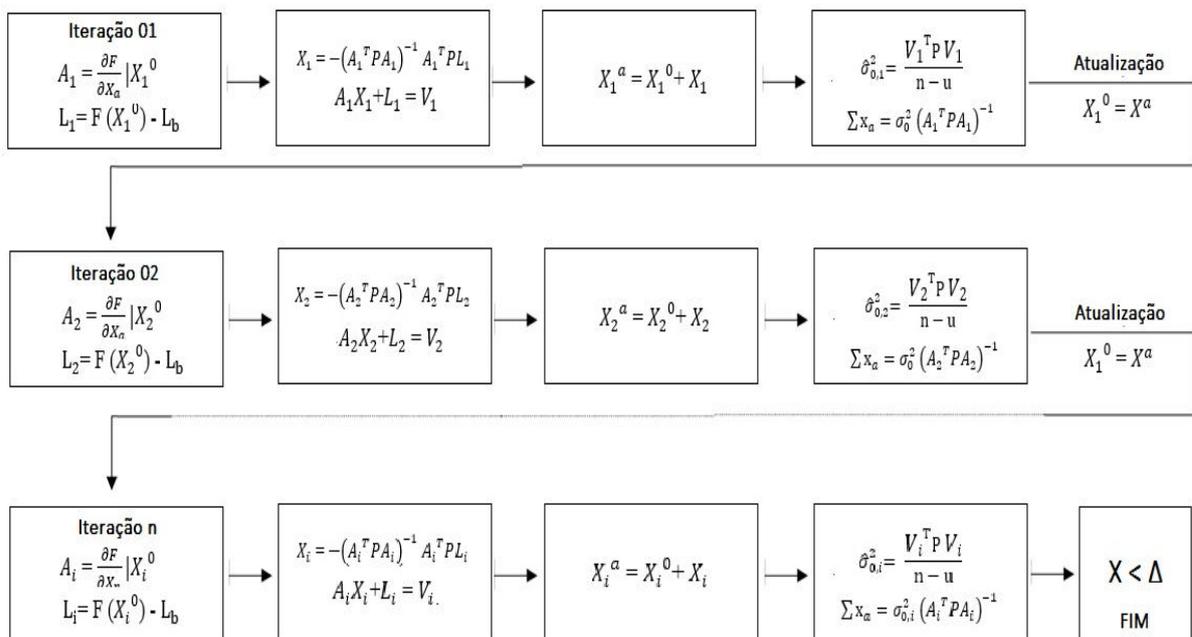
Sendo N a matriz dos coeficientes das equações normais, expressa pela Equação 45 e U o vetor dos termos independentes, representado na Equação 46.

$$N = A^T P A \quad (45)$$

$$U = A^T P L \quad (46)$$

Os modelos não-lineares requerem técnicas de otimização através de processos numéricos iterativos para conseguir a solução. Em razão da linearização do modelo devem-se repetir os cálculos até que os elementos do vetor X sejam mínimos sob alguma consideração, podendo com isso, serem utilizados quaisquer valores para as componentes do vetor X_0 . A Figura 25 mostra o processo iterativo através de um diagrama.

Figura 25 – Processo iterativo para o MMQ sob o modelo Paramétrico para modelos não-lineares.



Fonte: Adaptado de Gemael (1994).

2.10.2 MMQ - Modelo Combinado

De acordo com Gemael (1994), quando não há possibilidade de determinar as observações em função dos parâmetros, a solução por MMQ é dada pelo modelo combinado. No modelo de ajustamento combinado, pode ser entendido como um modelo de aplicações gerais, onde os valores observados e os parâmetros ajustados são relacionados por uma função não explícita, de acordo com a Equação (47).

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (47)$$

Para proceder à linearização do modelo, têm-se as Equações de 48 a 53:

$$V = L_a - L_b \quad (48)$$

$$X = X_a - X_0 \quad (49)$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} \quad (50)$$

$$B = \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} \quad (51)$$

$$W = F(X_0, L_b) \quad (52)$$

$$F(X_a, L_a) = F(X_0 + X, L_b + V) \sim F(X_0, L_b) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} (X_a - X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} (L_a - L_b) = 0 \quad (53)$$

Então, têm-se a Equação 54:

$$AX + BV + W = 0 \quad (54)$$

Considerando que existam n valores observados e u parâmetros ligados por r equações, resultam as seguintes dimensões para as matrizes (Equação 54):

$${}_r A_{uu} X_1 + {}_r B_{nn} V_1 + {}_r W_1 = {}_r 0_1 \quad (55)$$

Tem-se, $S = r - u$ graus de liberdade, sendo necessário $n > r - u$.

Conforme Gemael et al (1994), além de minimizar a forma quadrática fundamental, deve-se proceder de maneira que os resíduos (dos valores observados) e as correções X (dos parâmetros aproximados) atendam à injunção representada pela Equação 39. Utilizando multiplicadores de Lagrange, define-se a Equação 56:

$$\varphi = V^T P V - 2K^T (A X + B V + W) = \min \quad (56)$$

Onde:

K = Vetor das componentes, os quais são os multiplicadores de Lagrange ou correlatos.

Anulando as derivadas parciais em relação a V, K e X, obtêm-se as Equações 57 a 59:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial V} = 2P V - 2B^T K \rightarrow B^T K = 0 \quad (57)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial K} = -2(A X + B V + W) \rightarrow A X + B V + W = 0 \quad (58)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial X} = -2A^T K \rightarrow A^T K = 0 \quad (59)$$

As Equações matriciais 56, 57 e 58 representam um conjunto de $n + r + u$ equações algébricas envolvendo $n + r + u$ incógnitas: n resíduos (v), r correlatos (k) e u parâmetros (X). Ou, mais concisamente, as três equações matriciais mencionadas envolvem três incógnitas, os vetores V, K e X, e podem ser reunidas em uma hipermatriz (Equação 60) (GEMAEL, 1994):

$$\begin{bmatrix} P & -B^T & 0 \\ B & 0 & A \\ 0 & A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ K \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

A demonstração da resolução encontra-se em Gemael (1994). A Equação 60 resulta a Equação 61:

$$X = -(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} W \quad (61)$$

Em que:

$$M = B P^{-1} B^T \quad (62)$$

Obtida as componentes X_i do vetor das correções X através da Equação 62 a sequência pode ser realizada pelas Equações 63 a 65:

$$X_a = X_0 + X \quad (63)$$

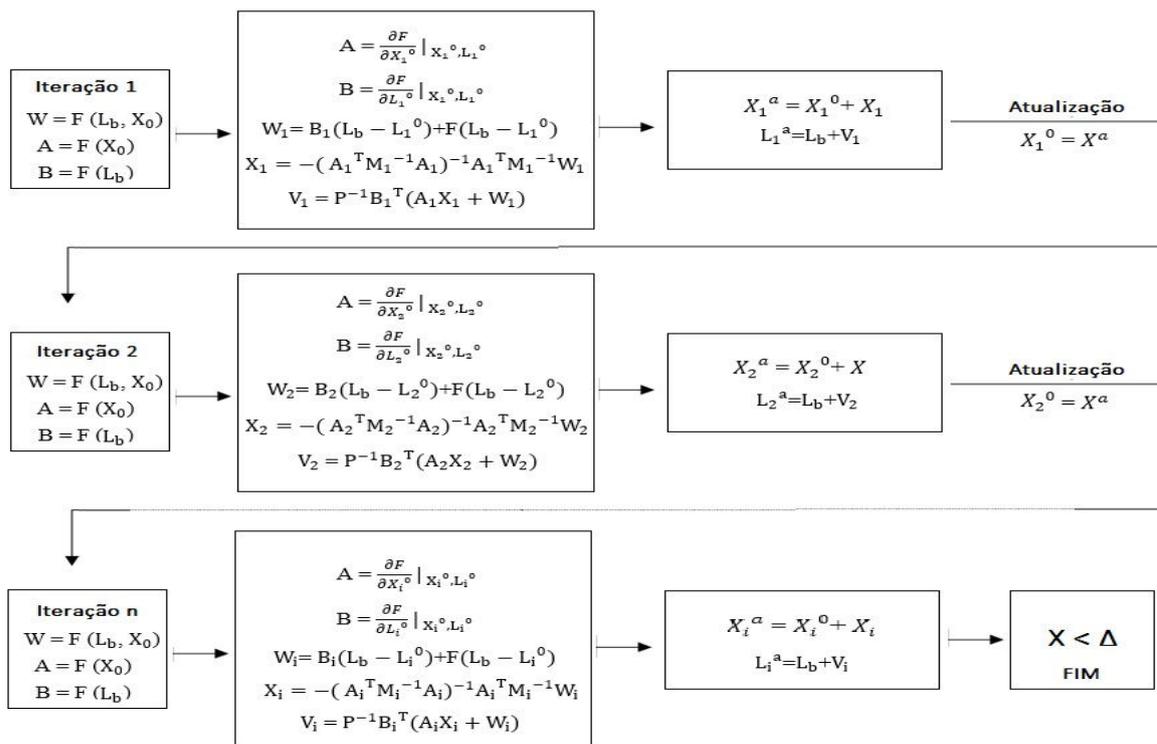
$$K = -M^{-1}(AX + W) \quad (64)$$

$$V = P^{-1}B^TK \quad (65)$$

$$L_a = L_b + V \quad (66)$$

Semelhante ao modelo Paramétrico, é necessário utilizar um processo iterativo de minimização. A Figura 26 mostra o processo iterativo através de um diagrama.

Figura 26 – Processo iterativo para o MMQ sob o modelo Combinado para modelos não-lineares.



Fonte: Adaptado Gemael (1994).

2.10.3 Estimativa da Precisão dos Parâmetros e dos Resíduos

De acordo com Gemael (1994) e Dalmolin (2004), em um modelo de ajustamento seja ele, paramétrico ou combinado, um fator importante é o estudo da correlação entre as observações presentes na Matriz Variância-Covariância (MVC). Através da Matriz Variância-Covariância podem-se conseguir as estimativas da qualidade dos parâmetros estimados e ajustados, das observações e dos resíduos. Conforme os mesmos autores, antes de realizar o ajustamento é preciso estimar a

precisão das medidas para formar a Matriz Variância-Covariância dos valores observados e, a partir do peso *a priori*, chegar à matriz dos pesos (Equação 67):

$$P = \sigma_0^2 \sum L_b^{-1} \quad (67)$$

Onde:

σ_0^2 = Variância da Unidade de Peso *a priori* (normalmente arbitrado igual a 1)

$\sum L_b^{-1}$ = Matriz Variância-Covariância dos valores observados

2.10.3.1 Matriz Variância-Covariância no Ajustamento pelo Modelo Paramétrico

De acordo com Geamel (1994), a Matriz Variância-Covariância dos parâmetros aproximados pode ser deduzida a partir da aplicação da lei de propagação de covariâncias, e estes são constantes, então a MVC dos parâmetros estimados também é proporcionado pela Equação 68 e Equação 69.

$$X = -(N)^{-1} (A^T P L) = -(N)^{-1} (A^T P (L_0 - L_b)) \quad (68)$$

$$X = -(N)^{-1} (A^T P L_0) + (N)^{-1} (A^T P L_b) \quad (69)$$

Utilizando a lei de propagação de covariância (Equação 70):

$$\sum x = G \sum L_b G^T \quad (70)$$

Onde, de acordo com a Equação 71:

$$G = (N)^{-1} A P \quad (71)$$

Considerando a Equação 72:

$$\sum L_b = \sigma_0^2 (P)^{-1} \quad (72)$$

Realizando o desenvolvimento, chega-se na Equação 73:

$$\sum x = \sum x_a = \sigma_0^2 (N)^{-1} \quad (73)$$

Para a MVC dos valores observados ajustados (Equação 74):

$$L_a = L_b + AX + (L_0 - L_b) = AX + L_0 \quad (74)$$

Usando a Lei de Propagação (Equação 75 e 76):

$$\Sigma L_a = A \Sigma x A^T \quad (75)$$

$$\Sigma L_a = \sigma_0^2 A (N)^{-1} A^T \quad (76)$$

A Matriz Variância-Covariância dos resíduos é determinada a partir da Equação 77:

$$V = L_a - L_b = \Sigma L_a - \Sigma L_b \quad (77)$$

2.10.3.2 Matriz Variância-Covariância no Ajustamento pelo Modelo Combinado

As demonstrações para o modelo combinado poderão ser encontradas em Gemael (1994) e Dalmolin (2004). A Matriz Variância-Covariância dos parâmetros é determinada pela Equação 78:

$$\Sigma x = \Sigma x_a = \hat{\sigma}_0^2 (A^T (M)^{-1} A)^{-1} \quad (78)$$

Em que:

$\hat{\sigma}_0^2$ = Variância da unidade de Peso *a posteriori*.

A Matriz Variância-Covariância dos valores observados ajustados (Equação 79):

$$\Sigma L_a = \hat{\sigma}_0^2 [(P)^{-1} + (P)^{-1} B^T (M)^{-1} A (A^T (M)^{-1} A)^{-1} A^T (M)^{-1} B (P)^{-1} (P)^{-1} B^T (M)^{-1} B (P)^{-1}] \cdot (79)$$

A Matriz Variância-Covariância dos resíduos e do erro de fechamento são demonstradas respectivamente, nas Equações (80) e (81):

$$\Sigma V = \hat{\sigma}_0^2 (P)^{-1} - \Sigma L_a \quad (80)$$

$$\Sigma W = \hat{\sigma}_0^2 M \quad (81)$$

2.11 TESTES ESTATÍSTICOS

Antes do ajustamento é admitida a ausência dos erros grosseiros e sistemáticos, considerando apenas a existência dos erros aleatórios nas observações. Contudo, os modelos matemáticos e observações devem ser analisados de modo que se possa determinar o quanto estes valores são confiáveis, antes da utilização dos valores estimados (KUANG, 1996).

2.11.1 Variância da Unidade de Peso

Conforme Gemael (1994), a variância da unidade de peso a priori não tem influência no vetor solução dos parâmetros estimados, mas somente na matriz dos coeficientes das equações normais N , portanto, seu valor pode ser escolhido arbitrariamente, desde que diferente de zero. Após o ajustamento, pode-se estimar a variância da unidade de peso (variância *a posteriori*).

A Variância da Unidade de Peso *a posteriori* pode ser obtida pela Equação 82:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n-u} \quad (82)$$

Em que:

$n - u$ = Graus de liberdade do sistema de equações.

O fator de variância a posteriori para o método combinado é determinado através da equação (83):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{-K^T W}{n-u} \quad (83)$$

2.11.2 Comparação entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$

A qualidade do ajustamento pode ser indicada por meio da discrepância entre os valores da variância da Unidade de Peso *a priori* (σ_0^2) e a variância da Unidade de Peso *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$). Quando houver, é utilizado um teste de hipótese baseado na distribuição Qui-Quadrado χ^2 para testar se a discrepância é significativa a certo nível

de significância, indicando possíveis problemas no ajustamento em caso de confirmação (GEMAEL, 1994).

No teste de hipótese são estabelecidas as hipóteses nulas (Equação 84) e alternativa (Equações 84 a 86). O teste pode ser colocado de forma geral, tomando uma amostra da variável (ou das variáveis) de uma dada população, de onde se tem uma hipótese sobre um determinado parâmetro (VIALI, 2016).

$$H_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2 \text{ (Teste da hipótese nula)} \quad (84)$$

De acordo com Viali (2016), após ter expressado a hipótese nula é conveniente determinar qual a hipótese aceita caso a hipótese nula seja rejeitada, isto é, convém explicitar a hipótese alternativa.

De forma geral, têm-se as possíveis hipóteses alternativas (Equações 85 a 87):

$$H_1: \hat{\sigma}_0^2 > \sigma_0^2 \text{ (teste unilateral ou unicaudal à direita)} \quad (85)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 < \sigma_0^2 \text{ (teste unilateral ou unicaudal à esquerda)} \quad (86)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2 \text{ (teste bilateral ou bicaudal)} \quad (87)$$

Conforme Gemael (1994), a forma quadrática (Equação 88 e Equação 89) tem distribuição de χ^2 com $v = S$ graus de liberdade:

$$V^T \Sigma L_b^{-1} V \approx \chi^2(v) \quad (88)$$

$$\frac{\hat{\sigma}_0^2 S}{\sigma_0^2} \approx \chi^2(v) \quad (89)$$

Compara-se o valor calculado com o valor teórico (tabelado):

$$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 < \chi^2 < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \quad (90)$$

O teste bilateral e ao nível de significância α de 5% será utilizado nesta dissertação, pois é o mais frequentemente aplicado na Geodésia.

2.11.3 Teste Data Snooping de Baarda para Identificação das Observações com Erros Grosseiros

De acordo com Marques (1994), o método pressupõe que as observações com erros grosseiros acarretam resíduos padronizados de magnitudes consideravelmente altas. Dependendo da magnitude do erro grosseiro, da geometria onde ocorre e do número de graus de liberdade, o seu efeito é diluído entre os resíduos e parâmetros, dificultando a análise dos erros grosseiros nas observações.

O procedimento estima uma observação contaminada com erros por vez, repetindo o teste para a localização de todas as observações suspeitas de erro grosseiro. As observações citadas são encontradas e retiradas, o ajustamento e o procedimento de teste é repetido em um processo iterativo até que todas as observações suspeitas sejam identificadas e retiradas. Contudo, pode acontecer falhas do método quando existem erros de pequena magnitude, o qual identifica observações isentas de erros juntamente com observações contaminadas (BAARDA, 1968).

As correções normatizadas (W) são calculadas, conhecendo a MVC e os resíduos, através da equação (91):

$$W = \frac{C^T P V}{\sqrt{C^T P \sum V P C}} \quad (91)$$

Onde:

C = o vetor n -dimensional da redundância parcial;

P = Matriz dos pesos;

$\sum V$ = MVC dos resíduos.

Quando a MVC das observações é diagonal, pode-se calcular o valor de W (Equação 92) para cada observação, tendo i sendo a observação a ser testada com $1 \leq i \leq n$.

$$W_i = \frac{V_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{V_i \sqrt{P_i}}{\sigma_0 \sqrt{r_i}} \quad (92)$$

Onde r_i é a raiz quadrada do elemento “i”, da diagonal principal da Matriz das redundâncias r . Se a matriz de peso P é diagonal, então o número de redundância é calculado através da Equação 93.

$$r_i = q_i P_i \quad (93)$$

Sendo q_i o elemento diagonal da Matriz Variância-Covariância dos resíduos da Equação 94.

$$Q_v = P^{-1} - A(A^T P A)^{-1} A^T \quad (94)$$

Onde:

W_i = O resíduo padronizado da observação “i”;

V_i = O resíduo da observação “i”;

σ_{vi} = O desvio padrão do resíduo “i”

P_i = Peso da observação “i”;

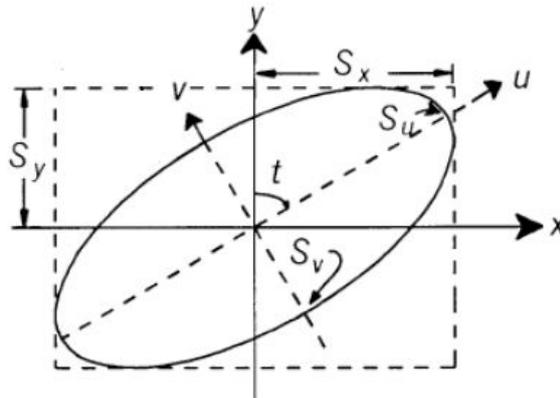
σ_0 = Raiz quadrada da variância q .

2.12 ELIPSE DOS ERROS

A elipse dos erros é uma maneira gráfica em apresentar as incertezas posicionais (Figura 27). A elipse pode ser interpretada como uma probabilidade da posição do ponto dentro da elipse, centrada na posição ajustada. Quanto menor a elipse dos erros mais preciso é o ponto, uma vez que as variâncias medidas nos eixos desta elipse são menores quando comparados aos demais vértices da poligonal (GEMAEL, 1994; GHILANI e WOLF, 1997).

A criação das elipses dos erros para os pontos é conforme a MVC dos parâmetros. A orientação da elipse é dada pela variação do sinal da covariância σ_{xy} e pela análise da variância em x em relação à de y . Diversas informações podem ser avaliadas ao analisar as formas, tamanhos e orientações das elipses dos erros. Suas características vão depender do controle utilizado pra restringir o ajuste, da precisão das observações e da geometria das medições (LEICK, 1995; GHILANI e WOLF, 1997).

Figura 27 – Elipse do erro.



Fonte: Ghilani e Wolf (1997).

A expressões dos semieixos S_u , semieixo S_v e do ângulo t de orientação da elipse são expressas pelas Equações 95 a 98:

$$S_u = \hat{\sigma}_{max} = \sqrt{0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + w)} \quad (95)$$

$$S_v = \hat{\sigma}_{max} = \sqrt{0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - w)} \quad (96)$$

$$w = \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \quad (97)$$

$$tg 2t = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad (98)$$

2.13 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

É inevitável que as medições sejam afetadas por um erro ou desvio de medida. Os instrumentos contêm incerteza inerente e a observação de um fenômeno não pode ser realizada sem a interferência de uma incerteza de medida. A incerteza resulta das limitações e das imperfeições do instrumento ou do método de medida. A precisão da incerteza é atribuída em torno do valor medido por um intervalo (simétrico ou não) caracterizado pelos algarismos significativos da medida. Os erros instrumentais são devidos às incertezas inerentes aos instrumentos e aos métodos de medida (KOGLER, 2008). Através de procedimentos, pretende-se minimizar esses erros:

- Seleção de instrumentos adequados;
- Operação correta dos instrumentos;
- Cuidando para que a montagem do experimento seja estável.

De acordo com Coelho (2013), a propagação dos erros pode ser preestabelecida na fase de planejamento através da lei de propagação de incertezas (Equação 99). Determinam-se as variáveis envolvidas em cada processo, com base no desvio-padrão das especificações dos instrumentos de medição, no método a ser aplicado e na variância dos pontos de partida.

Para maiores detalhes na demonstração da lei de propagação de incertezas é consultar (GEMAEL, 1994). Considerando duas variáveis aleatórias y e x , onde y é uma função linear de x :

$${}_m Y_1 = {}_m G_{nm} X_1 + {}_m C_1 \quad (99)$$

Sendo C um vetor ${}_m X_1$ de constantes e G uma matriz de coeficientes, têm-se a Equação 100:

$$\Sigma Y = G \Sigma X G^T \quad (100)$$

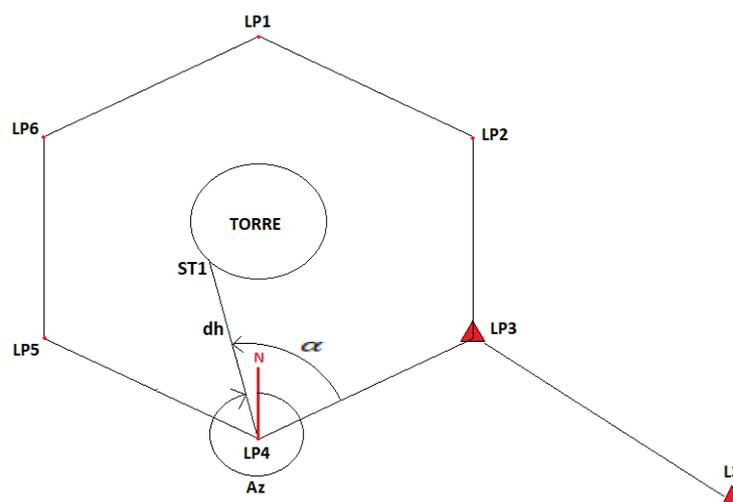
2.13.1 Propagação de Incertezas no Método Polar

No método polar ou método da irradiação (cf. item 2.5.3) o cálculo das coordenadas (X_{ST1} e Y_{ST1}) é realizado através das Equações 101 e 102, conforme a Figura 28.

$$X_{ST1} = X_{LP4} + d_h \text{ sen } (Az) \quad (101)$$

$$Y_{ST1} = Y_{LP4} + d_h \text{ cos } (Az) \quad (102)$$

Figura 28 – Método Polar na medição do ponto ST1 a partir do vértice LP4.



Fonte: O autor (2018).

O erro obtido na determinação do ponto LP4 deve ser propagada para a solda transversal (ST1) quando irradiado. Isto permite que a solda transversal (ST1) tenha as suas acurácias determinadas. Calcula-se a MVC das coordenadas X_{ST1} e Y_{ST1} , com base na Equação 103:

$$\Sigma X_{ST1}, Y_{ST1} = D \Sigma X_{LP4}, Y_{LP4}, AZ, d_h D^T \quad (103)$$

Onde a matriz das derivadas D são as Equações 104 e 105:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{ST1}}{\partial X_{LP4}} & \frac{\partial X_{ST1}}{\partial Y_{LP4}} & \frac{\partial X_{ST1}}{\partial AZ} & \frac{\partial X_{ST1}}{\partial d_h} \\ \frac{\partial Y_{ST1}}{\partial X_{LP4}} & \frac{\partial Y_{ST1}}{\partial Y_{LP4}} & \frac{\partial Y_{ST1}}{\partial AZ} & \frac{\partial Y_{ST1}}{\partial d_h} \end{bmatrix} \quad (104)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d_h \cos AZ & d_h \sin AZ \\ 0 & 1 & -d_h \sin AZ & d_h \cos AZ \end{bmatrix} \quad (105)$$

Obtém-se a matriz diagonal que contém a variância de cada observação (Equação 106):

$$\Sigma X_{LP4}, Y_{LP4}, AZ, d_h = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{LP4}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y_{LP4}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{AZ}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{d_h}^2 \end{bmatrix} \quad (106)$$

Em que:

$\sigma_{X_{LP4}}^2$ e $\sigma_{Y_{LP4}}^2$ = Acurácia de ST1 em X e Y;

σ_{AZ}^2 = Desvio-padrão do azimute;

$\sigma_{d_h}^2$ = Desvio-padrão linear da estação total.

Sendo o desvio-padrão linear da estação total GPT 3200 N/NW utilizada nesta dissertação (cf. item 3.2), de 5 mm + 5 ppm (partes por milhão) d_h . O cálculo é mostrado na Equação 107, segundo Ghilani e Wolf (1997):

$$\sigma_{d_h} = \left(\frac{5}{1000}\right) + \left(\frac{5}{1000000}\right) d_h \quad (107)$$

Como o desvio-padrão do azimute σ_{Az} não é conhecido, é realizado o cálculo da propagação de variância conforme a Equação 108:

$$Az = \left[\operatorname{tg}^{-1} \frac{(X_{LP3} - X_{LP4})}{(Y_{LP3} - Y_{LP4})} \right] + \alpha - 360 \quad (108)$$

A MVC do azimute (ΣAz) é calculada com base na Equação 109:

$$\Sigma Az = D \Sigma X_{LP3}, Y_{LP3}, X_{LP4}, Y_{LP4}, \alpha D^T \quad (109)$$

Sendo a matriz das derivadas D apresentada pela Equação 103, composta pelas Equações 110 a 115:

$$D^T = \left[\frac{\partial Az}{\partial X_{LP3}} \quad \frac{\partial Az}{\partial Y_{LP3}} \quad \frac{\partial Az}{\partial X_{LP4}} \quad \frac{\partial Az}{\partial Y_{LP4}} \quad \frac{\partial Az}{\partial \alpha} \right] \quad (110)$$

$$\frac{\partial Az}{\partial X_{LP3}} = \frac{(Y_{LP3} - Y_{LP4})}{(X_{LP3} - X_{LP4})^2 + (Y_{LP3} - Y_{LP4})^2} \quad (111)$$

$$\frac{\partial Az}{\partial Y_{LP3}} = \frac{(X_{LP4} - X_{LP3})}{(X_{LP3} - X_{LP4})^2 + (Y_{LP3} - Y_{LP4})^2} \quad (112)$$

$$\frac{\partial Az}{\partial X_{LP4}} = \frac{(Y_{LP4} - Y_{LP3})}{(X_{LP3} - X_{LP4})^2 + (Y_{LP3} - Y_{LP4})^2} \quad (113)$$

$$\frac{\partial Az}{\partial Y_{LP4}} = \frac{(X_{LP3} - X_{LP4})}{(X_{LP3} - X_{LP4})^2 + (Y_{LP3} - Y_{LP4})^2} \quad (114)$$

$$\frac{\partial Az}{\partial \alpha} = 1 \quad (115)$$

Obtém-se a matriz diagonal que contém a variância de cada observação (Equação 116):

$$\Sigma X_{LP3}, Y_{LP3}, X_{LP4}, Y_{LP4}, \alpha = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{LP3}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y_{LP3}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{X_{LP4}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_{LP4}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 \end{bmatrix} \quad (116)$$

Em que:

$\sigma_{X_{LP3}}^2$ e $\sigma_{Y_{LP3}}^2$ = Precisão das coordenadas do SAT02 em X e Y;

$\sigma_{X_{LP4}}^2$ e $\sigma_{Y_{LP4}}^2$ = Precisão das coordenadas de P3 em X e Y;

σ_{α}^2 = Desvio-padrão angular da estação total em radianos.

A resultante planimétrica é calculada com base na Equação 117:

$$\sigma_{\text{planimétrico}} = \sqrt{\sigma_{X_{ST1}}^2 + \sigma_{Y_{ST1}}^2} \quad (117)$$

3 EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS

Os métodos empregados para a determinação dos pontos de referência do Sistema de Referência de Medição estável foram definidos por meio de posicionamento por satélites método relativo estático (cf. item 2.6.1) e Métodos Terrestres de Medição (MTM) planialtimétricos com emprego de estação total (poligonação com centragem forçada (cf. item 2.6.2.1) e nivelamento trigonométrico de visadas unilaterais (cf. item 2.6.3.1)) e com nível digital (nivelamento geométrico de alta precisão (cf. item 2.6.3.2)).

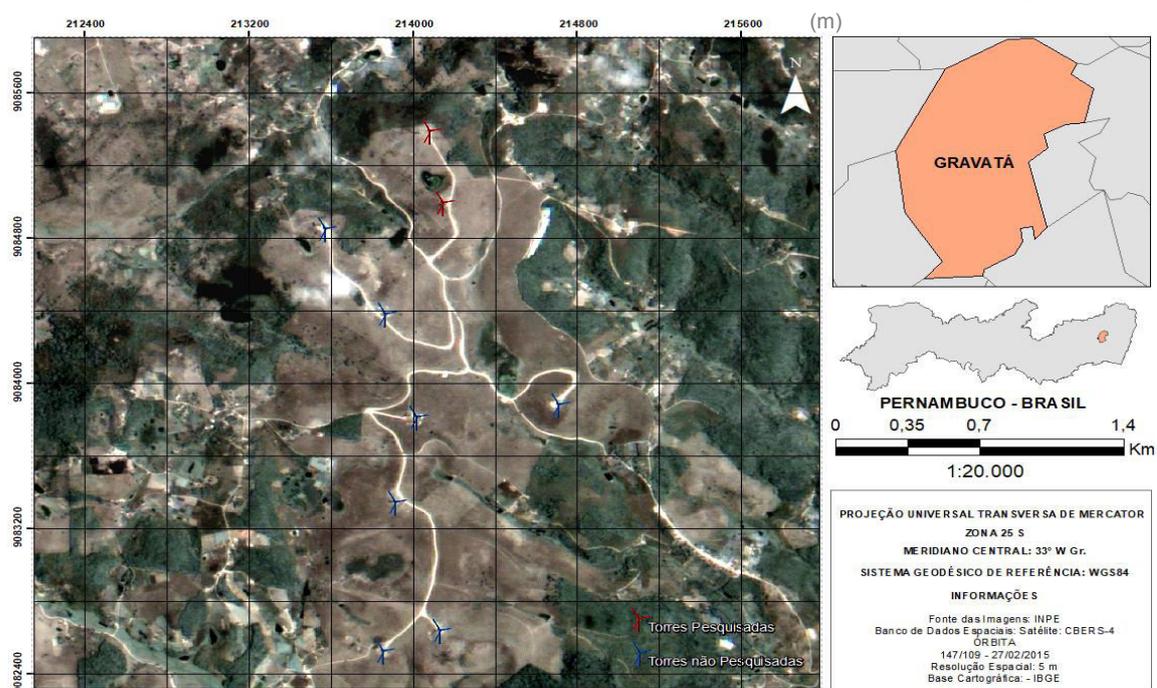
Os métodos de levantamento aplicados nos pontos-objeto foram realizados a partir da irradiação tridimensional (cf. item 2.8.1) e do método de medição de bordas (cf. item 2.8.3).

O nível de confiança de 95% foi adotado como indicador da qualidade dos levantamentos com GNSS, nível digital e estação total. A seguir serão abordadas a metodologia, a descrição das medições e procedimentos realizados.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O empreendimento pertence a Eólica Technology Ltda e está localizado no agreste do estado de Pernambuco nas altas altitudes do município de Gravatá, sendo responsável pelo primeiro parque eólico localizado no estado. O Parque Eólica Gravatá Geradora de Energia S.A (Figura 29), é composto por nove aerogeradores da marca Vestas modelo V82, destinados a transformar energia eólica em energia elétrica dividida por sub-parques.

Figura 29 – Mapa de localização do parque eólico da Eólica Technology Ltda.



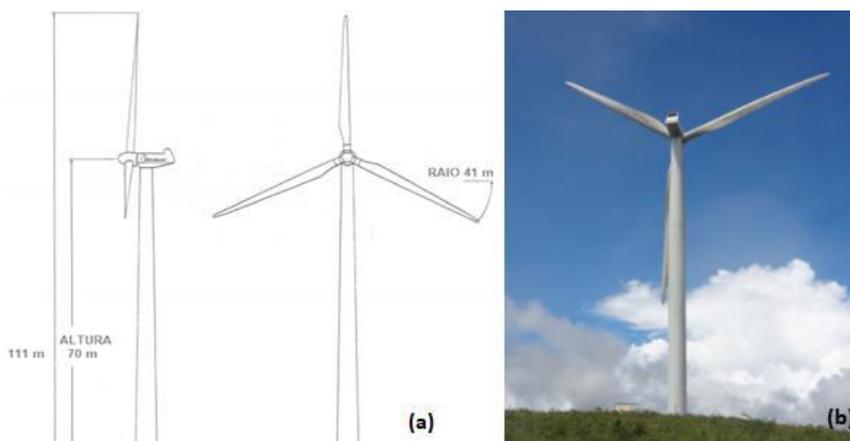
Fonte: O autor (2017).

3.1.1 Torres Eólicas Investigadas

O objeto de pesquisa consiste em uma Torre de aço tubular de forma cônica constituída por um número de secções pré-fabricadas. Segundo Vestas (2018), a torre da área de pesquisa possui 70 m de altura da base ao cubo do rotor, variando o diâmetro linear ao longo de seu comprimento, e pás com comprimento de 40 m. A Figura 30 ilustra as descrições da torre eólica.

Figura 30 – Torre eólica pesquisada. (a) Especificações dimensionais da torre eólica.

(b) Torre eólica monitorada.

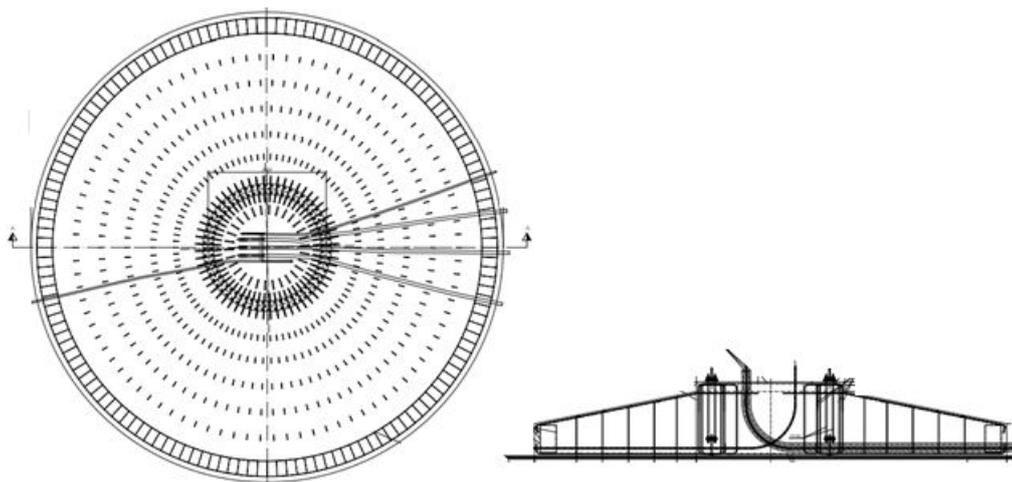


Fonte: (a) Adaptado de Vestas, 2018)

3.1.2 Fundações das Torre Eólicas Pesquisadas

No parque eólico onde estão instaladas as torres eólicas foi utilizada a fundação em sapata isolada circular, devido as características das torres eólicas instaladas e pela constituição do solo local, onde a camada de solo próxima à superfície é resistente. A Figura 31 apresenta o projeto geométrico da fundação das torres eólicas monitoradas no estudo.

Figura 31 – Sapata Isolada Circular.



Fonte: Eólica Gravatá (2018)

3.2 RECURSOS TECNOLÓGICOS

- Receptores GNSS HIPER V Topcon: Dupla frequência (L1/L2), Rádio com alcance de até 2km em RTK, Precisão horizontal de 3mm + 0,5 ppm e vertical de 5mm + 0,5 ppm para levantamentos estáticos e rápido-estáticos e horizontal de 10mm + 1 ppm e vertical de 15mm + 1 ppm para levantamentos cinemáticos e RTK;
- Estação Total (GPT 3200 N/NW), precisão angular (5") e linear (5mm + 5ppm);
- Apoio logístico (prismas, tripés, suportes bastão-tripé, nível de cantoneira, marreta, fios a prumo, base nivelante, adaptadores base – prisma, trena e outros);
- Nível Digital DNA 03 Leica: Precisão de 0,3mm/km duplo nivelado;
- Mira de invar Leica de 2m de código de barras;

- *Softwares*: QGIS 2.8.1, MAPGEO2015 (Versão 1.0), MATLAB (versão R2015a), Excel (versão 2013), AstGeoTop (GARNÉS, 2017), AutoCad 2010 e Topcon Tools (versão 8.2).

3.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Em conformidade com as justificativas e necessidades para o monitoramento de torre eólica, foi desenvolvido um fluxograma com os passos realizados nos procedimentos para a implantação dos pontos de referência, levando em consideração o levantamento planialtimétrico da área no entorno das torres, assim como a locação e o levantamento dos pontos de referência, utilizando métodos com o emprego de estação total, nível digital e receptores GNSS de dupla frequência. Em seguida, são apresentados os passos realizados nos procedimentos para a definição e os levantamentos dos pontos-objeto localizados nas torres. A Figura 32 exibe o fluxograma da metodologia empregada.

A operação topográfica de reconhecimento na área, definição das torres eólicas para o monitoramento, a análise geoespacial e definição da configuração geométrica para a distribuição dos pontos de referência no entorno da torre eólica são abordados no item 3.4.

Os procedimentos de locação, a forma de materialização dos pontos de referência e definição dos pontos-objeto são descritos no item 3.5.

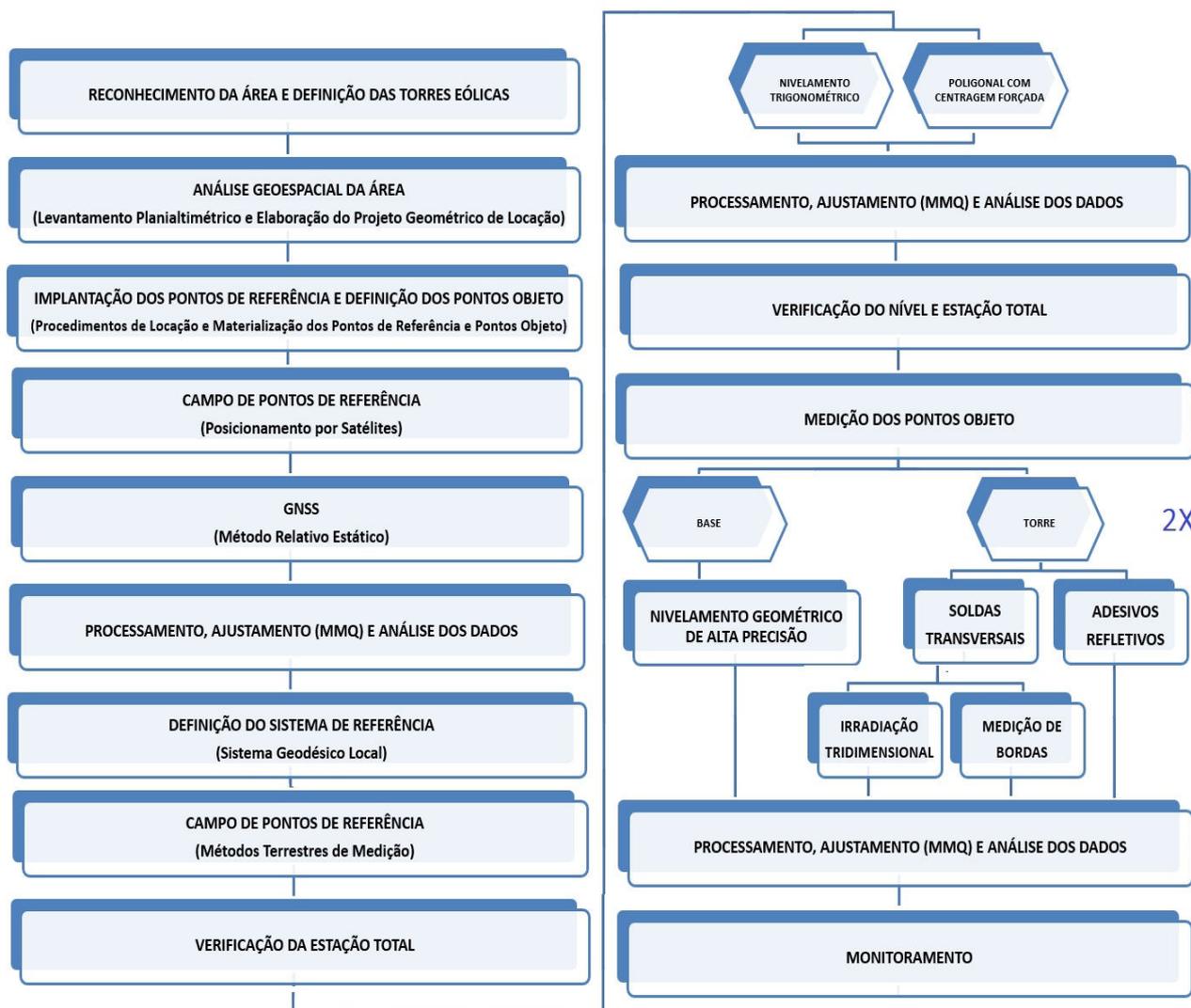
No item 3.6 constam as metodologias para a definição de coordenadas a partir do levantamento GNSS e a forma de processamento, ajustamento (MMQ) e análise dos dados. De acordo com os resultados, foi definido o Sistema Geodésico Local e realizado a transformação de coordenadas.

Os métodos terrestres de medição dos pontos de referência com estação total, processamento, ajustamento (MMQ) e análise dos resultados estão descritos no item 3.7.

Os métodos para verificar o nível digital e estações totais e respectivos resultados são descritos no item 3.8.

O item 3.9 é constituído pelos procedimentos referentes a realização das medições dos pontos-objeto e avaliação de possíveis deslocamentos da torre eólica no plano horizontal e vertical para o monitoramento da torre eólica.

Figura 32 - Fluxograma seriado para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: O autor (2017).

3.4 ANÁLISES ESPACIAIS PARA O POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA

Foi realizada uma operação topográfica de reconhecimento na área onde as torres (Gravatá 01 e Gravatá 02) estão instaladas para definir a configuração geométrica do levantamento (Figura 33). Através da materialização de três vértices intervisíveis (E1, E2 e E3) em torno da torre eólica Gravatá 02, para o desenvolvimento de uma poligonal com a finalidade de realizar o levantamento das feições planialtimétricas no entorno da torre eólica. Os pontos de detalhes foram levantados pelo método de poligonação 3D e o vértice E1 foi escolhido como origem.

Figura 33 - Reconhecimento no entorno das torres eólicas área da pesquisa.



Fonte: O autor (12/09/2017).

Os dados levantados no campo foram processados no software AstGeoTop. Os resultados do processamento da poligonal demonstraram um erro angular de $-9,2''$, sendo distribuído igualmente nos vértices da poligonal. O erro linear de $0,0083\text{m}$ foi corrigido proporcionalmente à distância horizontal de cada lado do polígono. A precisão relativa, expressa pela razão entre o erro linear e o comprimento total da poligonal, foi igual a $1/20283,6165$.

Os cálculos do ajustamento da poligonal foram realizados através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) utilizando o modelo paramétrico. Os resultados do processamento da poligonal encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Planilha da poligonal de reconhecimento ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico.

Estação	Ponto Visado	Ângulo	Distância (m)	Azimute	Erro médio relativo	0,22 < χ^2 < 9,35
E1	E2	80°15'49,7"	47,849	80°15'47,0"	1/20283,3856	0,680
E2	E3	54°03'16,3"	65,914	314°19'03,3"	1/20284,5398	
E3	E1	45°40'54,0"	54,142	179°59'57,3"	1/20282,6966	

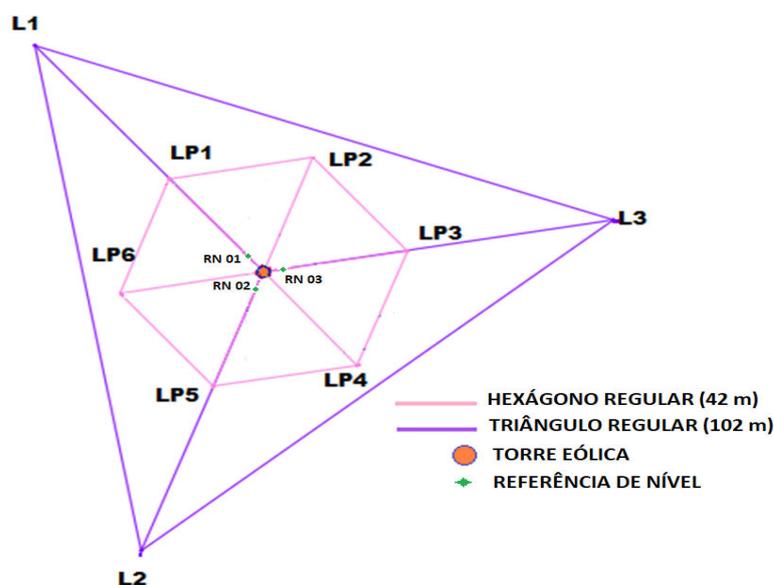
Fonte: O autor (2017).

Uma rede geodésica bem modelada proporciona aporte para que se sejam capazes de observar possíveis deslocamentos e deformações na geometria da torre, possibilitando o monitoramento e garantindo um Sistema de Referência de Medição estável.

Para dispor de visadas com o mínimo de três direções da torre, foram projetadas duas configurações para a distribuição dos pontos de referência (Figura 34):

- Triângulo equilátero (L1, L2 e L3);
- Hexágono regular (LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6).

Figura 34 – Configuração geométrica para a distribuição dos pontos de referência no entorno da torre eólica.

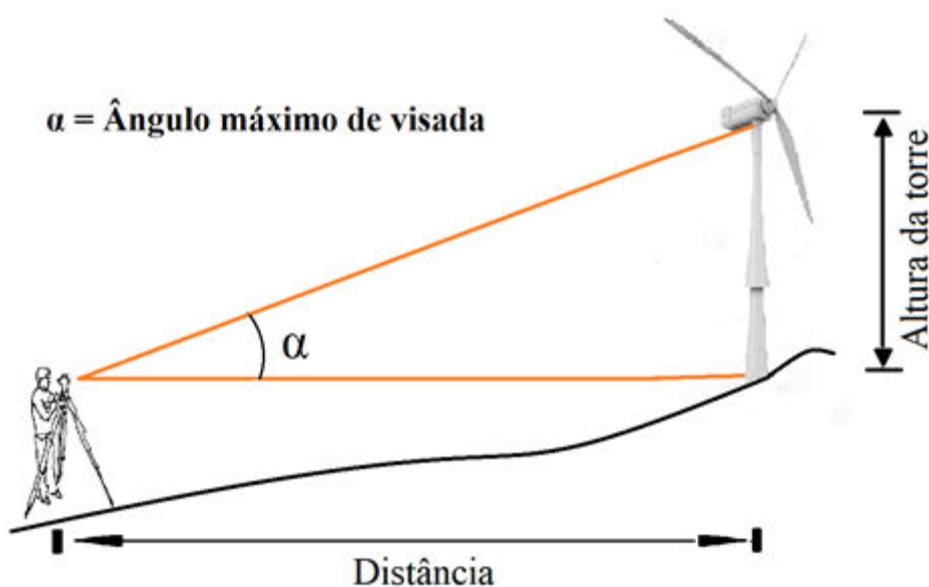


Fonte: O autor (2017).

Onde ambos (Triângulo e Hexágono) possuem o centro de simetria da geometria coincidente ao centroide da torre eólica Gravatá 02.

O objetivo do triângulo equilátero é materializar em seus vértices os pontos de referência com uma distância que possa observar no mesmo alinhamento todos os pontos-objeto nas diferentes alturas da torre. Para determinar a distância mínima entre os vértices do triângulo equilátero e a possibilidade de observar o ponto-objeto mais alto da torre sem o emprego de ocular de cotovelo, foi empregado à metodologia das razões trigonométricas, através da altura da torre e o máximo ângulo zenital observado na estação total com a ausência da ocular de cotovelo. A Figura 35 exemplifica o método.

Figura 35 – Determinação da distância mínima para implantação dos marcos de referência.



Fonte: O autor (2017).

No hexágono regular houve a materialização dos pontos de referência em seus vértices e posicionados próximo à torre para satisfazer os seguintes propósitos:

- Garantir observações na base e os pontos-objeto mais próximos, evitando o impedimento devido o relevo irregular;
- Abrangência posicional para o monitoramento da torre eólica com o auxílio de ocular de cotovelo;
- Vértices no mesmo alinhamento do triângulo regular dispendo intervisibilidade entre a torre e os pontos de referência perfilados do triângulo (L1, L2 e L3);

- Acréscimo de viabilidade para o monitoramento da nascelle e componentes em diferentes épocas conforme a orientação do rotor em relação ao vento;
- Mais observações no entorno da torre;
- Mostrar como os pontos altos poderiam ser determinados com a ocular de cotovelo.

3.5 PROCEDIMENTOS DE LOCAÇÃO E MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS-OBJETO

A locação foi realizada posteriormente o estudo do projeto geométrico. Este procedimento consiste em transferir os vértices do projeto geométrico para o terreno. A implantação dos pontos em campo foi executada por meio do método Polar (cf. item 2.5.3). Através do AutoCAD 2010 foi elaborado o projeto de locação (Tabela 5), baseado nas informações obtidas no reconhecimento de campo, onde foram calculadas direções horizontais e distâncias planas em relação aos vértices E1, E2 e E3 (cf. item 3.4). Com estes valores foi possível indicar a posição dos pontos de interesse e realizar a materialização. Contudo, houveram locações que necessitaram do uso de trena devido a declividade acentuada do terreno, ocasionando em desvios posicionais na materialização.

Figura 36 – Locação dos vértices.



Fonte: O autor (30/01/2018).

Tabela 5 – Caderneta de locação.

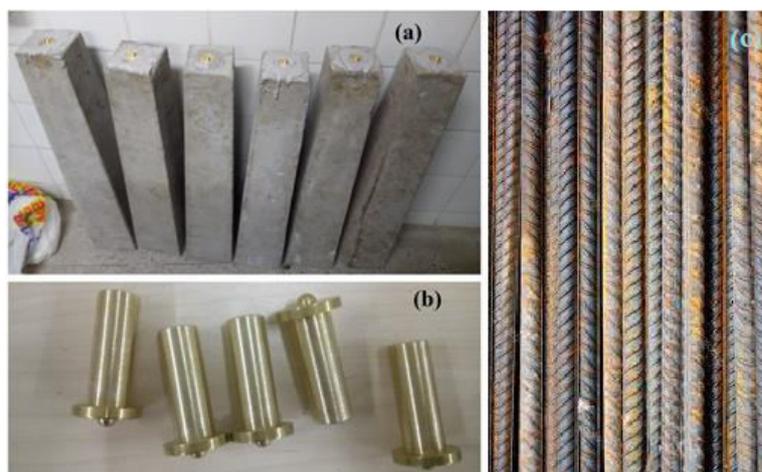
Estação	Ré	Ponto	Ângulo Hz	Distância Horizontal (m)
E1	E3	LP4	90°3'16,88"	31,570
		L2	205°26'34,56"	70,550
		LP5	233°11'48,62"	12,230
		LP6	304°02'03"	44,390
		L1	331°03'06,18"	126,020
		LP1	340°46'33,57"	68,110
E2	E1	LP2	75°46'51,84"	69,500
		LP3	97°30'03,02"	31,370
		L3	153°55'06,18"	71,360
		LP4	342°12'37,45"	17,580
E3	E1	LP5	9°03'00,59"	62,240
		LP6	51°28'04,71"	47,030
		LP1	114°23'36,86"	24,630
		L1	132°37'16,37"	82,890
		LP2	227°18'39,98"	25,760
		L3	272°20'10,92"	105,110
		LP3	287°45'14,01"	48,230

Fonte: O autor (2018).

A materialização dos Pontos de Referência foi realizada da seguinte forma:

- Marcos de concreto: Peças de concreto em forma de tronco de pirâmide, com 10 cm de aresta na face superior e 12 cm na inferior, altura de 60 cm, confeccionados com um traço 1x3x3 (cimento, areia e pedra) e pedra britada. No centro do topo do marco foi fixado o pino com superfície semiesférica (Figura 37(a));
- Pinos com superfície semiesférica de 1 cm de diâmetro com 6 cm de comprimento (Figura 37(b));
- Hastes de ferro com 0,50 m (Figura 37(c)).

Figura 37 - Materialização dos vértices. (a) Marcos de concreto. (b) Pinos com superfície semiesférica. (c) Haste de ferro.



Fonte: O autor (2018).

A materialização dos vértices (Figura 38) pertencentes à geometria posicional do triângulo equilátero (L1, L2 e L3) foi efetuada através de marcos de concreto. O hexágono regular teve seus vértices com o mesmo alinhamento do triângulo equilátero (LP1, LP3 e LP5) materializados com marcos de concreto, enquanto os demais (LP2, LP4 e LP6) por meio de hastes de ferro.

Figura 38 – Pontos de Referência materializados por marcos de concreto e hastes de ferro.



Fonte: O autor (30/01/2018).

Foram implantados 03 pinos com superfícies semiesféricas (RN01, RN02 e RN03) (Figura 39) na torre eólica Gravatá 02 e outros 03 pinos (RN04, RN05 e RN06) com iguais configurações na base da torre eólica Gravatá 01 a aproximadamente 450 metros de distância da torre eólica Gravatá 02, perfurados e fixados com adesivo epóxi de alta aderência, no mesmo alinhamento dos pontos de referência L1, L2 e L3, servindo como referência para a realização do duplo nivelamento geométrico de alta precisão, utilizando mira de código de barras, providas de prumos esféricos, visadas equidistantes para avaliar possíveis deslocamentos e alterações das posições relativas.

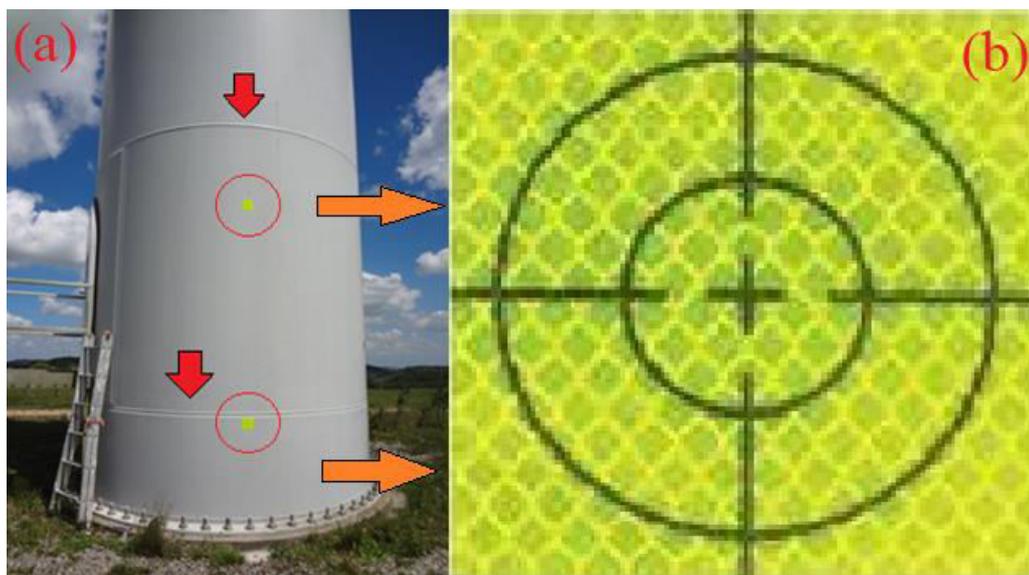
Figura 39 – Pontos-objeto materializados por pinos com cabeça semiesférica.



Fonte: O autor (30/01/2018).

A torre eólica Gravatá 02 consiste em uma estrutura de monopolos de aço (cf. item 2.2.4 e 3.1.1), onde os pontos-objeto (Figura 40) definidos para avaliar a verticalidade da torre foram por meio das ligações entre os segmentos da torre (soldas transversais (ST)) e os flanges (Figura 06). Outros pontos-objeto definidos para avaliar a verticalidade da torre foram por intermédio de alvos refletivos alinhados com os pontos de referência do triângulo regular.

Figura 40 – Pontos-Objeto através das soldas transversais entre segmentos da torre (a) e alvos refletivos (b).



Fonte: O autor (30/01/2018).

A proposta inicial era colocar adesivos de alvos refletivos nos 3 alinhamentos definidos na torre em diferentes alturas, com o intuito de servir como alvos para medições no plano vertical nas diferentes épocas e na posição direta (PD) e na posição inversa (PI) da luneta. Devido à inviabilidade da paralização do funcionamento da torre eólica e fixação dos alvos refletivos com o auxílio da equipe de rapel, foram fixados apenas dois alvos refletivos em cada alinhamento, servindo para medições nos segmentos inferiores e alinhamento referência nas soldas transversais superiores, exibido na Figura 40.

3.6 LEVANTAMENTO GNSS DOS PONTOS DE REFERÊNCIA E DEFINIÇÃO DO SISTEMA GEODÉSICO LOCAL

Posteriormente a realização da locação, as coordenadas interligadas ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 para o georreferenciamento dos Pontos de Referência foram obtidas através do levantamento GNSS por intermédio do método de posicionamento estático (cf. item 2.6.1). Foram utilizados 02 receptores GNSS de dupla frequência (L1/L2) com precisões nominais descritas no item 3.2, adotando as seguintes configurações:

- Máscara de elevação: 5°;

- Taxa de gravação: 5 segundos;
- Nível de confiança: 95%.

Na Tabela 6 é apresentada a época da coleta dos dados utilizados.

Tabela 6 – Época da campanha GNSS.

Campanha		Semana GPS	Dia do ano
Mês	Ano		
Janeiro	2018	1986	30

Fonte: O autor (2018).

Os receptores foram posicionados sobre os pontos de referência (L1, L2, L3 e LP3) com tripés e bases nivelantes (Figura 41). As antenas foram horizontalizadas e orientadas aproximadamente para o Norte Geográfico a fim de diminuir o erro de orientação.

Figura 41– Campanha do levantamento GNSS.



Fonte: O autor (30/01/2018).

O tempo de rastreamento em cada vértice encontra-se na Tabela 7, seguindo as orientações do IBGE (2008) para definir de forma confiável o tempo de rastreamento das observações em função do comprimento da linha de base e do tipo de equipamento utilizado.

Tabela 7 – Tempo de rastreio.

Vértice	Duração
L1	08:22:45
L2	04:01:30
L3	01:59:35
LP3	01:34:30

Fonte: O autor (2018).

A melhor precisão das coordenadas foi obtida com a utilização das estações de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) RECF (Recife), PBCG (Campina Grande) e PBJP (João Pessoa). Os dados foram processados com efemérides precisas devido às linhas de base longas e necessidade de maior precisão. O software Topcon Tools 8.2 foi utilizado para o processamento e as coordenadas geocêntricas, coordenadas geodésicas resultantes e respectivos desvios padrão provindos do processamento e ajustamento encontram-se respectivamente nas Tabela 8 a 10.

Tabela 8 - Coordenadas Cartesianas Geocêntricas dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000.

Vértice	Coordenadas Cartesianas Geocêntricas		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
L1	5133456,643	-3674473,946	-911476,527
L2	5133509,684	-3674445,698	-911310,516
L3	5133404,350	-3674582,229	-911347,215
LP3	5133440,518	-3674537,942	-911366,323

Fonte: O autor (2018).

Tabela 9 - Coordenadas Geodésicas dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000.

Vértice	Coordenadas Geodésicas		
	Φ	λ	h (m)
L1	8°16'12,80682"S	35°35'40,87108"W	775,428
L2	8°16'07,33498"S	35°35'39,11190"W	777,962
L3	8°16'08,54595"S	35°35'44,74241"W	777,120
LP3	8°16'09,14438"S	35°35'42,87798"W	783,463

Fonte: O autor (2018).

Tabela 10 - Desvios padrão dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000

Vértice	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_{Hz}
L1	0,006	0,007	0,017	0,009
L2	0,006	0,007	0,017	0,009
L3	0,006	0,007	0,017	0,009
LP3	0,006	0,007	0,017	0,010

Fonte: O autor (2018).

3.6.1 Definição do Sistema Geodésico Local e Transformação de Coordenadas

Para a transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no SGL, por rotações e translações, na mesma escala, conforme as equações matemáticas citadas no item 2.6.4, foi utilizado o vértice L1 como origem do SGL ($X_0 = 150000,000$ m e $Y_0 = 250000,000$ m), respeitando a NBR 14166 (ABNT,1998).

Para a definição do eixo z assumiu-se que as coordenadas referentes equivalem às suas respectivas altitudes ortométricas (H). De acordo com a Equação 118, a altitude ortométrica é definida mediante a subtração da altitude geométrica (h) conhecidas a partir do processamento dos dados obtidos no posicionamento por GNSS e ondulação geoidal (N), calculadas através do MAPGEO2015 (Tabela 11). Deve-se salientar que os dados obtidos pelo MAPGEO2015 possuem um erro médio quadrático de $\pm 0,17$ m, provenientes de interpoladores que tentam adaptar e prever a superfície geoidal a partir de uma malha regular.

$$H = h - N \quad (118)$$

Tabela 11 – Valores das ondulações geoidais.

Vértice	N (m)
L1	-05,47
L2	-05,47
L3	-05,47
LP3	-05,47

Fonte: O autor (2018).

Os valores das coordenadas transformadas no Sistema Geodésico Local estão na tabela 12.

Tabela 12 – Valores das coordenadas no SGL.

Vértice	X (m)	Y (m)	H (m)
L1	150000,000	250000,000	780,898
L2	149987,395	250168,124	783,432
L3	149881,512	250130,916	782,590
LP3	149938,576	250112,529	788,933

Fonte: O autor (2018).

3.7 LEVANTAMENTOS DOS PONTOS DE REFERÊNCIA COM ESTAÇÃO TOTAL

O levantamento foi realizado pelo método da poligonação 3D com centragem forçada nos vértices do hexágono regular, pelo caminhamento, pois ao passo que foi percorrido o trajeto definido pelos vértices formadores do hexágono regular, foram medidas as distâncias inclinadas entre os vértices e os ângulos horizontais entre direções dos alinhamentos da poligonal, tendo os demais pontos de referência determinados pelo método da irradiação tridimensional.

O levantamento foi padronizado com as seguintes especificações e procedimentos:

- Materialização dos vértices por centragem forçada (cf. item 2.6.2.1);
- Percurso e medição do ângulo horizontal no sentido horário;
- Realização de 2 séries de medidas na posição direta e inversa da luneta;
- Medição das distâncias, direções horizontais e ângulos verticais dos vértices ré e vante.

Os dados da medição foram cálculos, processados, analisado a qualidade, transformados de coordenadas geocêntricas SIRGAS2000 em coordenadas no SGL e ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados através do software MATLAB, AstGeoTop e Excel.

Os resultados referentes ao cálculo analítico da poligonal e os pontos irradiados constam nas Tabela 13 e 14. A poligonal apresenta as seguintes particularidades:

- Classe de Poligonal = IP (ABNT, 1994);
- Perímetro = 251,9075 m;
- Erro do fechamento angular = 0°00'03,3";
- Erro linear sem compensação angular em X = 0,0123 m;

- Erro linear sem compensação angular em Y = -0,0019 m;
- Erro linear sem compensação angular em h = -0,0245 m;
- Erro linear horizontal = 0,0124 m;
- Precisão relativa = 1/20243,77.

Dada à restrita dimensão espacial dos pontos de referência e pontos-objeto, estes pontos tiveram suas cotas determinadas a um plano horizontal de referência. Pode-se definir cota como pontos cuja posição é conhecida por suas coordenadas (x, y) acrescida o valor da posição espacial (H). A referência de nível RN02 foi estabelecido como a cota de referência e arbitrado o valor de 1000,000 m. Com base nesta referência, foi definida a cota dos demais vértices através do nivelamento geométrico de alta precisão e nivelamento trigonométrico de visadas unilaterais. Os procedimentos dos métodos estão descritos no item 2.6.3.

Tabela 13– Cálculo analítico do ângulo, distância e azimute da poligonal fechada.

Estação	Ponto Visado	Ângulo	Distância Plana (m)	Azimute
LP3	LP2	120°02`33,2"	41,947	167°49`02,2"
LP3	L3	240°04`45,6"	59,947	107°51`12,4"
LP2	LP1	119°58`39,8"	41,992	107°47`42,0"
LP1	LP6	120°03`59,8"	41,941	47°51`41,8"
LP1	L1	240°05`45,1"	60,029	347°50`26,7"
LP6	LP5	119°57`59,5"	42,019	347°49`41,3"
LP5	LP4	120°04`06,3"	41,944	287°53`47,6"
LP5	L2	239°52`07,6"	59,764	227°40`00,3"
LP4	LP3	119°52`41,7"	42,065	227°46`29,3"

Fonte: O autor (2018).

Tabela 14 - Cálculo analítico das coordenadas totais tridimensionais da poligonal fechada.

Estação	Ponto Visado	Coordenadas Totais Tridimensionais		
		X (m)	Y (m)	H (m)
LP3	LP2	149938,5760	250112,5290	999,8959

Continua

Estação	Ponto Visado	Coordenadas Totais Tridimensionais		
		X (m)	Y (m)	H (m)
LP3	L3	149881,5150	250130,9080	993,5663
LP2	LP1	149947,4281	250071,5267	995,7549
LP1	LP6	149987,4110	250058,6934	997,0639
LP1	L1	150000,0000	250000,0000	991,5120
LP6	LP5	150018,5114	250086,8326	995,7139
LP5	LP4	150009,6519	250127,9070	999,2489
LP5	L2	150053,8460	250168,1350	994,4060
LP4	LP3	149969,7374	250140,7964	999,9949

Fonte: O autor (2018).

As Tabelas 15 e 16 apresentam as observações planimétricas ajustadas pelo MMQ através do modelo paramétrico. Os desvios-padrão angulares, das coordenadas ajustadas e o controle de qualidade do ajustamento com 1σ , através do Teste Global Qui-Quadrado (χ^2), utilizando o teste bilateral e ao nível de significância de 5%, encontram-se na Tabela 17.

Tabela 15 - Elementos da poligonal ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico.

Estação	Pto. Visado	Ângulo Hz	Distância Plana (m)	Azimute
LP3	LP2	120°02'35,5"	41,945	167°49'02,3"
LP3	L3	239°33'05,7"	59,948	107°48'04,0"
LP2	LP1	119°58'39,0"	41,988	107°47'41,4"
LP1	LP6	120°03'59,1"	41,939	47°51'40,5"
LP6	LP5	119°57'59,0"	42,021	347°49'39,4"
LP5	LP4	120°04'06,1"	41,948	287°53'45,5"
LP5	L2	239°51'43,7"	59,761	227°41'23,1"
LP4	LP3	119°52'41,3"	42,067	227°46'26,8"

Fonte: O autor (2018).

Tabela 16 - Coordenadas da poligonal ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico.

Estação	Coordenadas Ajustadas	
	X (m)	Y (m)
L2	150053,8390	250168,1380
L3	149881,5140	250130,5523
LP1	149987,4068	250058,6964
LP2	149947,4277	250071,5283
LP3	149938,5760	250112,5290
LP4	149969,7266	250140,8003
LP5	150009,6450	250127,9101
LP6	150018,5052	250086,8342

Fonte: O autor (2018).

Tabela 17 - Desvios-padrão, erro posicional e controle de qualidade do ajustamento MMQ – Modelo Paramétrico (1σ).

Est.	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_{Angular}	$\sigma_{\text{Distância}}$ (m)	P. Posição(m)	$0,22 < \chi^2 < 9,35$
LP3	0,0098	0,0114	0,6961	0,0067	0,0151	2,672
LP2	0,0099	0,0132	0,6966	0,0067	0,0165	
LP1	0,0116	0,0131	0,6966	0,0067	0,0175	
LP6	0,0121	0,0135	0,6963	0,0067	0,0181	
LP5	0,0121	0,0126	0,6963	0,0067	0,0175	
LP4	0,0110	0,0123	0,6962	0,0067	0,0165	

Fonte: O autor (2018).

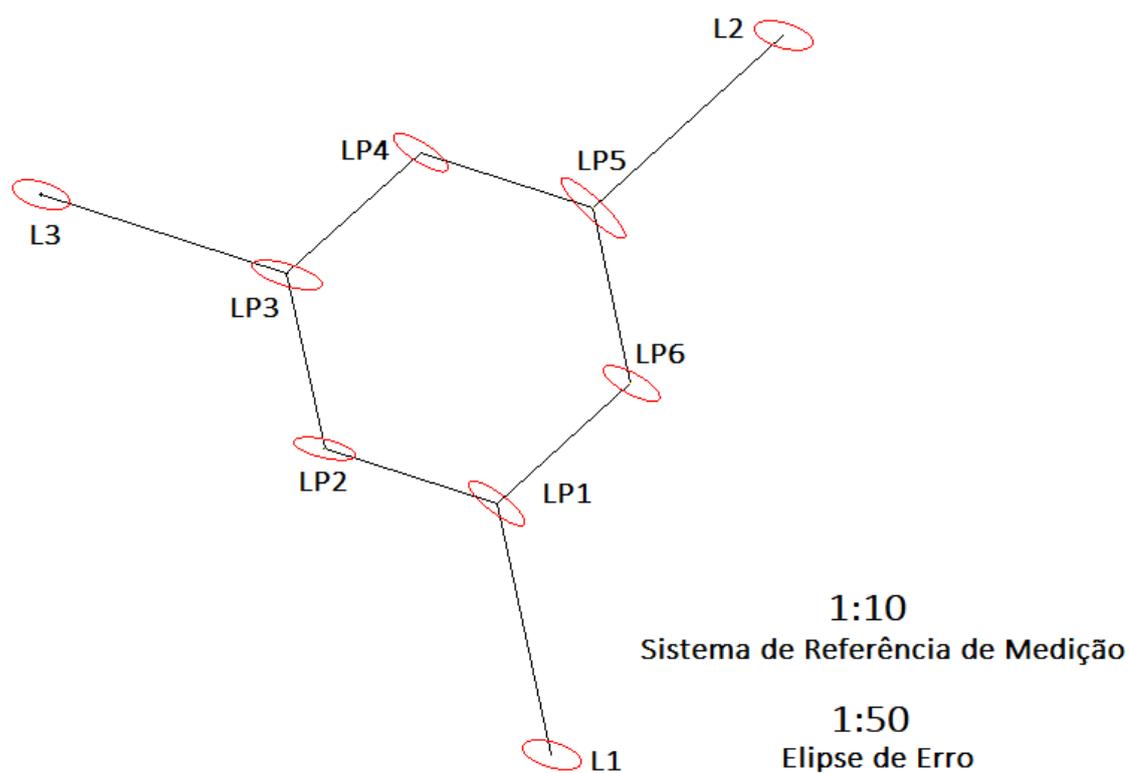
Conforme o item 2.12, a forma, tamanho, e a orientação das elipses dos erros dos pontos de referência foram determinados a partir da MVC (cf. item 2.10.3) do ajustamento MMQ modelo paramétrico, através do desvio padrão da coordenada x, desvio padrão da coordenada y e covariância entre elas. Por meio das Equações 95, 96 e 98 pode-se obter, respectivamente, o semieixo maior e semieixo menor da elipse e o ângulo. Os resultados encontram-se na Tabela 18. A figura 42 mostra a representação geométrica das elipses dos erros.

Tabela 18- Semieixo maior, semieixo menor e orientação das elipses dos erros dos pontos de referência.

Estação	Semieixo Maior (m)	Semieixo Menor (m)	Orientação
L1	0,0060	0,0070	106°37'05,4588"
L2	0,0060	0,0070	106°10'41,1405"
L3	0,0060	0,0070	107°10'04,4319"
LP3	0,0096	0,0173	106°32'09,6935"
LP2	0,0082	0,0145	103°01'08,2018"
LP1	0,0091	0,0162	127°37'11,8223"
LP6	0,0093	0,0141	118°53'11,4463"
LP5	0,0088	0,0199	133°22'43,0327"
LP4	0,0091	0,0149	123°01'26,3579"

Fonte: O autor (2018).

Figura 42 – Elipses dos erros dos pontos de referência.



Fonte: O autor (2018).

3.8 PROCEDIMENTOS DE CAMPO PARA TESTE DO NÍVEL DIGITAL E ESTAÇÕES TOTAIS

Testes foram efetuados para a verificação do nível digital e estações totais utilizados nas medições de campo, pretendendo conferir se os instrumentos citados estão dentro do valor de precisão estabelecidos pelos fabricantes.

3.8.1 Verificação do Nível Digital

Através da base de verificação de níveis no Campus Recife da UFPE, localizada na frente do prédio do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG/ CTG/UFPE (SEIXAS e SEIXAS, 2015), foi realizado a verificação do Nível Digital DNA 03 Leica mediante o método Kukkamäki (Figura 43), descritos no item (2.9.1), através dos comandos embutidos do nível digital para verificar o erro de colimação do instrumento.

Figura 43 – verificação do Nível Digital.



Fonte: O autor (30/09/2018).

De acordo Silva e Seixas (2017), a base de verificação e retificação possui 60 m de comprimento, separados em trechos de 10 m, sendo implantados 4 pinos com superfícies semiesféricas a cada 20 m (A, B, C e D) e 3 pontos auxiliares (E1, E2 e

E3) com pregos cravados equidistantes entre os pontos A e B, B e C, C e D, respectivamente, aos pontos auxiliares.

Na base de verificação e retificação o nível digital foi estacionado no ponto auxiliar E1, realizando a leitura da mira ínvar nos pontos A e B, em seguida o nível é instalado no ponto auxiliar E2, realizando-se leituras nos pontos B e A. O nível digital é instalado em cada ponto auxiliar sobre um tripé, centrado pelo fio a prumo e nivelado utilizando o nível esférico.

As verificações do nível digital ocorreram nos dias 09/04/2018 e 30/08/2018, antes das campanhas de medição nas torres eólicas. A Tabela 19 e a Tabela 20 mostram as observações realizadas e os valores referentes ao erro de colimação nas respectivas datas mencionadas.

Tabela 19– Verificação através do Método de Kukkamäki ocorrida em 09/04/2018.

Estação	Ponto Visado	Leitura ré (m)	Leitura vante (m)	Distância (m)	Desnível	C(m)
E1	A	1,42812		9,98	-0,01611	0,000035
	B		1,44423	9,95		
E2	B	1,44002		19,95	0,01604	
	A		1,42398	39,95		

Fonte: O autor (2018).

Tabela 20 – Verificação através do Método de Kukkamäki ocorrida em 30/08/2018,

Estação	Ponto Visado	Leitura ré (m)	Leitura vante (m)	Distância (m)	Desnível	C(m)
E1	A	1,33581		9,96	-0,01624	0,000075
	B		1,35205	9,98		
E2	B	1,31946		19,97	0,01639	
	A		1,30307	40,00		

Fonte: O autor (2018).

Conforme os resultados obtidos para o erro de colimação (C) houve a necessidade de retificar o nível digital antes da segunda campanha de medição, através das funções internas apropriadas do instrumento.

3.8.2 Verificação das Estações Totais

Foram realizadas a verificação do limbo horizontal e o vertical das estações totais antes de cada campanha de medição. As averiguações ocorreram hall-jardim do NIATE CCEN/CTG (Figura 44), onde estão fixados 30 alvos em 10 pilares do hall (SILVA e SEIXAS, 2017b), confeccionados em fitas adesivas de dupla face, fitas adesivas de uma face e placas de inox.

Figura 44 – Verificação das estações totais no hall-jardim do NIATE CCEN/CTG.



Fonte: O autor (27/08/2018).

A coleta de dados para verificar o limbo vertical e o horizontal ocorreu através do método de reiteração. O método consiste em realizar a medição do ângulo em um determinado número de vezes, mudando a origem de forma a que se tenham leituras distribuídas por toda extensão do limbo. O intervalo das origens é determinado em função do número de reiterações. Foram realizadas a medições de 10 alvos com 3 reiterações. Os cálculos foram realizados no AstGeoTop (GARNÉS, 2017) e os resultados das estações totais nas duas campanhas encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Verificação das estações totais nas duas campanhas de medição.

Estação total	Primeira Campanha		Segunda Campanha	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
121/2012	5,4"	11,7"	5,7"	12,2"
122/2012	5,2"	11,2"	5,3"	11,5"

Fonte: O autor (2018).

Contudo, as estações totais já tinham sido verificadas e atestadas conforme as precisões estabelecidas, antes da operação de reconhecimento e locação, não sendo necessário realizar os procedimentos de averiguação.

3.9 PROCEDIMENTOS PARA O MONITORAMENTO DA TORRE EÓLICA

A realização do monitoramento geodésico tem como objetivo identificar variações de coordenadas de uma amostra de pontos em um determinado período. Os resultados atingidos sinalizam se os pontos tiveram suas coordenadas modificadas, indicando provável deslocamento.

A proposta inicial para monitoramento era composto de medições temporais dos alvos refletivos em diferentes alturas; nos três alinhamentos que estão contidos os vértices L1, LP1, L3, LP3, L2 e LP5, e por intermédio de medições temporais dos vértices LP2, LP4 e LP6 das soldas transversais (ST), cujo os alinhamentos seriam definidos via medições do ângulo horizontal médio resultante das medições das bordas direita e esquerda da torre. Deste modo, seria possível avaliar com maior precisão as possíveis variações de coordenadas dos pontos-objeto. Contudo, devido aos problemas descritos no item 3.5, houve modificações nos quais serão descritos a seguir.

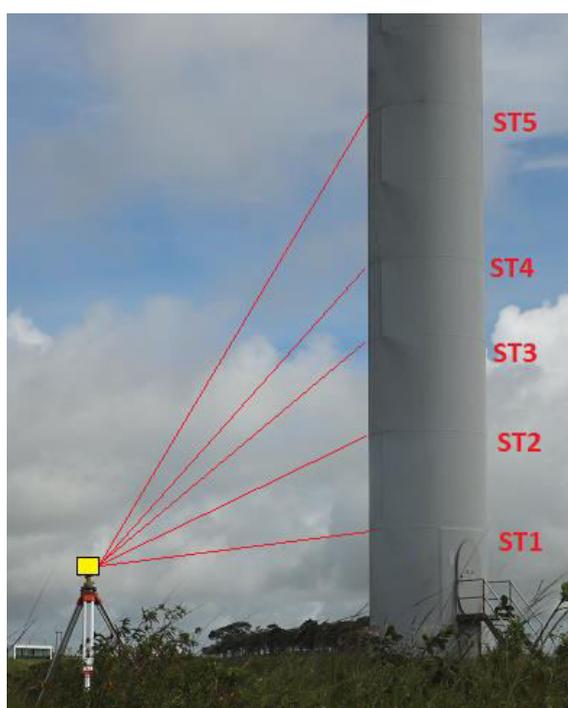
3.9.1 Descrição dos Pontos-Objeto Monitorados da Torre

Todos os vértices passaram a medir as soldas transversais (ST) em diferentes alturas arbitradas, exceto para os vértices que tinham visadas para os alvos refletivos implantados, nos quais foram realizadas as medições nas soldas transversais e nos alvos refletivos.

As soldas transversais utilizadas para o monitoramento foram definidas conforme a configuração dos pontos de referência do triângulo equilátero e do hexágono regular, para melhor discriminar o ângulo de deformação e controle geométrico da estrutura.

Os pontos de referência do hexágono regular foram responsáveis pela medição da seção da torre mais próximas da base. Ao todo, foram escolhidas 05 soldas transversais (ST1 a ST5) para análise. A Figura 45 ilustra o esquema descrito.

Figura 45 – Soldas transversais medidas sobre os pontos de referência do hexágono regular.



Fonte: O autor (2018).

Os pontos de referência do triângulo equilátero tem a possibilidade de observar no mesmo alinhamento todos os pontos-objeto nas diferentes alturas da torre. A princípio, todas as soldas transversais pertencentes à torre seriam observadas em cada vértice. Entretanto, devido a declive do terreno apenas no vértice L1 havia possibilidade de medições na primeira solda transversal e no vértice L3 na solda transversal do topo, sem necessidade de ocular de cotovelo.

Além dos fatores citados, as campanhas de medição necessitariam de um prazo maior para realizar as medições em todos os vértices. Após a primeira campanha de medição (cf. item 4.1), onde houve melhor assimilação da geometria da

torre, resolveu adotar as soldas transversais ST2, ST5, ST9, ST11, ST14, ST18, ST20 e ST22 para o monitoramento.

3.9.2 Procedimentos para a Realização das Medições da Torre Eólica

Para o monitoramento e avaliação de possíveis deslocamentos da torre eólica no plano horizontal e vertical, foram empregados métodos geodésicos planialtimétricos com emprego de estação total e do método geodésico altimétrico com o uso do nível digital. Tais procedimentos são descritos em seguida.

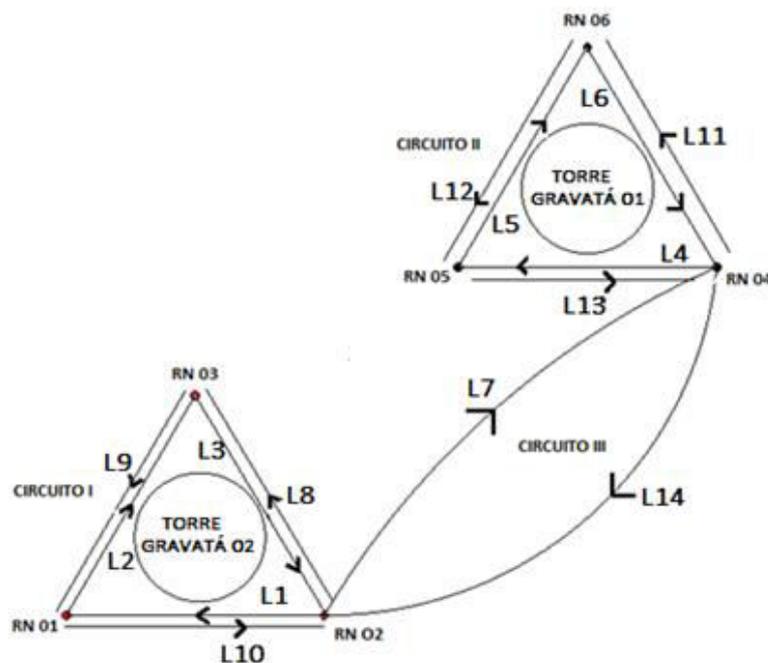
3.9.2.1 Procedimentos para o Monitoramento no Plano Vertical

O monitoramento vertical da torre ocorreu através de nivelamento geométrico de altíssima precisão, empregando-se visadas iguais, entre os pinos com superfície semiesféricas implantados na estrutura da base da torre eólica monitorada Gravatá 02 e na base da torre Gravatá 01 a 450 m de distância. O percurso do nivelamento é constituído das seguintes etapas:

1. Circuito entre os pinos da torre Gravatá 02 com a seguinte orientação:
 - a. Nivelamento: RN02 → RN01 → RN03 → RN02;
 - b. Contranivelamento: RN02 → RN03 → RN01 → RN02.
2. Nivelamento partindo da RN02 até a RN04 pertencente à outra torre;
3. Circuito entre os pinos da torre Gravatá 01 com a seguinte orientação:
 - a. Nivelamento: RN04 → RN05 → RN06 → RN04;
 - b. Contranivelamento: RN04 → RN06 → RN05 → RN04.
4. Contranivelamento partindo da RN04 e retornando a RN02.

A Figura 46 ilustra os circuitos descritos. O circuito I entre os pinos no entorno da torre Gravatá 02, o circuito II entre os pinos no entorno da torre Gravatá 01 e o circuito III entre as RN2 e RN04.

Figura 46 – Esquema dos circuitos realizados com o nivelamento geométrico.



Fonte: O autor (2018).

3.9.2.2 Procedimentos para o Monitoramento no Plano Horizontal

A avaliação do deslocamento horizontal ocorreu mediante as medições indiretas com o uso de estações totais instaladas sobre todos os pontos de referência do Sistema de Referência de Medição (cf. item 3.4). Foram utilizados os métodos da irradiação tridimensional (cf. item 2.8.1) e medição de bordas (cf. item 2.8.3) para as medições dos pontos-objeto. As leituras realizadas em todos os métodos foram feitas na posição direta e na posição inversa da luneta em cada solda transversal. Entretanto, os pares de leituras não foram conjugados, sendo consideradas leituras independentes, devido à incerteza de realizar a pontaria no mesmo ponto.

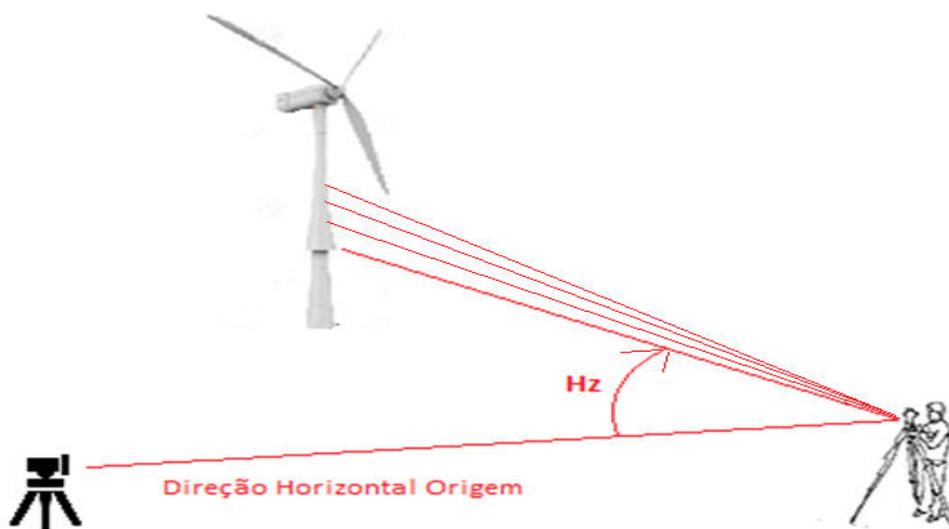
São descritas as etapas utilizadas para as medições indiretas de cada solda transversal com o uso do método da irradiação tridimensional:

- Definição da direção origem de leitura dos ângulos horizontais através de um prisma estacionado em um ponto de referência visível;
- Abertura do ângulo horizontal até o alinhamento referência de medição;
- Freio do movimento horizontal e movimento vertical da luneta até a solda transversal;

- Através dos parafusos micrométricos, faz-se um ajuste fino, até a linha inferior da solda transversal (definido para padronizar as medições) está no centro da cruz na mira da estação total;
- Medição de direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada.

A Figura 47 exemplifica o procedimento para a medição com o uso do método da irradiação tridimensional.

Figura 47 – Procedimento para a medição das soldas transversais.



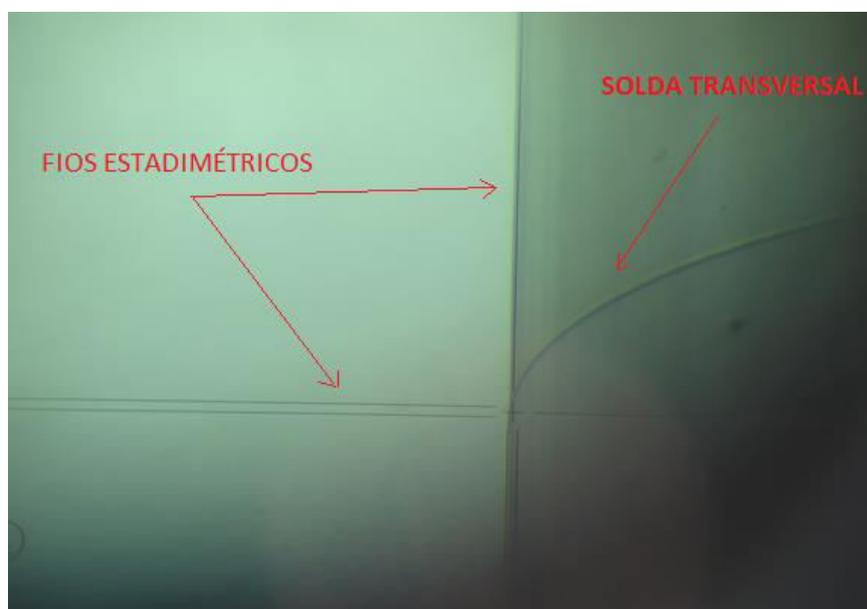
Fonte: O autor (2018).

As medições da solda transversal realizadas com o método da medição de bordas seguiram o seguinte procedimento:

- Definição da direção origem de leitura dos ângulos horizontais através de um prisma estacionado em um ponto de referência visível;
- Abertura do ângulo horizontal até a borda esquerda da solda transversal;
- Tornar coincidentes o fio estadimétrico horizontal central com a solda transversal e o fio estadimétrico vertical com a linha reta formada pela borda da torre;
- Medição de direção horizontal e ângulo vertical;
- Abertura do ângulo horizontal até a borda direita da solda transversal;
- Coincidir a solda transversal com o fio estadimétrico horizontal central e a linha reta formada pela borda da torre com o fio estadimétrico vertical;
- Medição de direção horizontal e ângulo vertical.

O procedimento em coincidir a solda transversal com o fio estadimétrico horizontal central e a linha reta formada pela borda da torre com o fio estadimétrico vertical é ilustrado na Figura 48.

Figura 48 – Procedimento para a medição de bordas da torre eólica.



3.10 CAMPANHAS DE MEDIÇÕES DA TORRE EÓLICA

O monitoramento envolveu a realização de 02 campanhas de medições dos pontos-objeto (pinos com superfície semiesférica, soldas transversais e adesivos refletivos) para compreender o comportamento da estrutura, sua geometria e verificar a existência de prováveis deslocamentos. Todas as campanhas foram compostas de acordo com as seguintes fases:

- Fase I – Nivelamento geométrico de alta precisão entre os pinos com superfície semiesférica implantados na estrutura da base da torre eólica Gravatá 02 e na base da torre eólica Gravatá 01;
- Fase II – Medições das soldas transversais e alvos refletivos por meio do método da irradiação tridimensional e as bordas das soldas transversais com o método da medição de bordas, sobre os pontos de referência L1, L2 e L3 em seus respectivos alinhamentos;

- Fase III – Continuidade das medições dos alvos refletivos e soldas transversais por meio do método da irradiação tridimensional e medição de bordas sobre os pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

O monitoramento de possíveis movimentações verticais da torre eólica é o objetivo principal da fase I. A verificação de possível rebaixamento de toda a torre ou parte da estrutura é possível através do nivelamento geométrico de alta precisão, por meio de medições dos pinos com superfície semiesférica implantados na base. Os procedimentos para a determinação das dimensões, forma e posição da torre foram as principais finalidades das fases II e III.

3.10.1 Primeira Campanha de Medição

A campanha de medições geodésicas planialtimétricas para o início do monitoramento da torre eólica ocorreram nos dias 20/04/2018, 21/04/2018 e 22/04/2018.

No período vespertino da data de 20/04/2018 teve o início da fase I da primeira campanha de medição. O nivelamento geométrico ocorreu entre os pinos com superfície semiesférica localizados nas bases das torres eólicas, com o uso de visadas iguais e por nivelamento e contranivelamento, cumprindo o percurso descrito no item 3.9.2.1. A Figura 49 ilustra o circuito entre os pinos no entorno da torre Gravatá 02 e nivelamento partindo da RN02 até a RN04.

Figura 49 – Circuito no entorno da torre Gravatá 02 e o percurso do nivelamento geométrico entre a RN02 e RN04 da primeira campanha.



Fonte: O autor (20/04/2018).

A realização do circuito entre os pinos da torre Gravatá 01 ocorreu no fim do período vespertino. O percurso do contranivelamento da RN04 até a RN02 foi realizado às escuras do período noturno, sendo auxiliado por lanternas de led e farol veicular. A Figura 50 mostra o percurso e as dificuldades apresentadas.

Figura 50 – Circuito no entorno da torre Gravatá 01 e dificuldades apresentadas no contranivelamento entre a RN04 e RN02 da primeira campanha.



Fonte: O autor (20/04/2018).

Em 21/04/2018, com início no período diurno e término no vespertino, foram realizadas as medições das soldas transversais e alvos refletivos, conforme a fase II. Os levantamentos foram prejudicados em consequência do mau tempo que dificultaram a visibilidade dos pontos-objeto, devido a neblina, as oscilações e vibrações provenientes da pressão que o vento exerceu sobre a torre. A Figura 51 ilustra as dificuldades apresentadas.

Figura 51– Dificuldades apresentadas durante as medições do segundo dia da primeira campanha.



Fonte: O autor (21/04/2018).

Foram realizadas medições dos alvos refletivos e soldas transversais possíveis, por intermédio dos métodos da irradiação tridimensional e medição de bordas em cada ponto referência do triângulo equilátero (L1, L2 e L3) em seus respectivos alinhamentos (cf. item 3.4), para compreender a "silhueta da torre", ou seja, precisar sua geometria. Devido à declividade do terreno em cada vértice, foram observadas as seguintes soldas transversais:

- Ponto referência L1: ST01 até ST22;
- Ponto referência L2: ST02 até ST22;
- Ponto referência L3: ST02 até ST26.

Em 22/04/2018 iniciou a fase III da primeira campanha de medição. O mau tempo perpetuou e prejudicou severamente as medições das soldas transversais ST1, ST2, ST3, ST4 e ST5, através dos vértices do hexágono. No entanto, foram realizadas as medições da irradiação tridimensional e medição de bordas sobre os pontos de referência LP1 e LP2, e apenas medições da irradiação tridimensional sobre os pontos de referência LP3.

A primeira campanha permitiu definir e averiguar uma metodologia de medição para a próxima campanha de medição.

3.10.2 Segunda Campanha de Medições

As medições referentes à segunda campanha nas torres eólicas aconteceram nos dias 01/09/2018, 02/09/2018 e 03/09/2018.

A fase I teve início em 01/09/2018. Diferente da primeira campanha, o nivelamento geométrico foi realizado por caminhamento duplo, ou seja, o nivelar simultaneamente dois caminhamentos entres dois pontos com auxílio de quatro sapatas. O percurso permaneceu conforme detalhado no item 3.9.2.1 e a Figura 52 descreve o nivelamento geométrico da segunda campanha.

Figura 52– Nivelamento geométrico da segunda campanha.



Fonte: O autor (01/09/2018).

O segundo dia de medições começou em uma manhã chuvosa do dia 02/09/2018 e término no fim da tarde, ilustradas na Figura 53. Os resultados dos levantamentos da primeira campanha ajudaram assimilar a geometria da torre e definir quais soldas transversais seriam necessárias para realizar as medições sem a necessidade de medir todas as soldas transversais. Foram definidas e observadas as seguintes soldas transversais: ST02, ST05, ST09, ST11, ST14, ST18, ST20 e ST22.

Com a quantidade reduzida de soldas transversais a serem medidas, houve tempo para realizar medições parciais da fase II e fase III. As medições ocorreram sobre os pontos de referência L1, L2, LP1, LP2, LP4 e LP5 em seus respectivos alinhamentos por meio dos métodos da irradiação tridimensional e medição de bordas.

As chuvas no período da manhã dificultaram a visibilidade e possibilidade das medições dos pontos-objeto, mas no período da tarde teve predomínio do sol. A Figura 53 mostra as dificuldades apresentadas durante o tempo chuvoso.

Figura 53 – Dificuldades apresentadas durante as medições do segundo dia da segunda campanha.



Fonte: O autor (02/09/2018).

As medições finais ocorreram na manhã do dia 03/09/2018. Seguindo os procedimentos do dia anterior, os métodos da irradiação tridimensional e medição de bordas foram realizados sobre os vértices L3, LP3 e LP6 resultando no fim das fases II e III. A Figura 54 expõe as medições finais da fase II e fase III da segunda campanha.

Figura 54 – Medições do terceiro dia da segunda campanha.

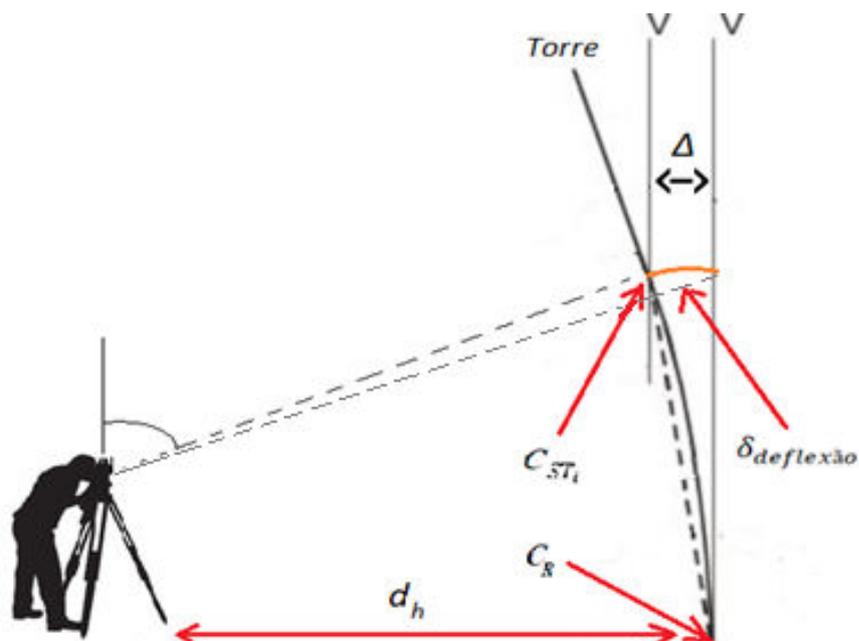


Fonte: O autor (03/09/2018).

3.11 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA TORRE

Em uma torre ideal (não sujeita a esforços) com seções circulares, as posições planimétricas dos centros de cada solda transversal encontram-se na mesma posição planimétrica. Para a análise da verticalidade da torre foi realizado o cálculo do ângulo de deflexão, definido como o ângulo plano formado entre a projeções de um alinhamento origem e de um determinado alinhamento apontado, ou seja, ângulo medido entre o deslocamento de qualquer ponto e o alinhamento vertical de referência. A Figura 55 ilustra o exemplo do ângulo de deflexão em uma torre eólica. Nesta dissertação foi definido como alinhamento de referência o centro geométrico da seção circular da solda transversal inferior de cada campanha.

Figura 55 – Exemplo de ângulo de deflexão em uma torre eólica.



Fonte: O autor (2018).

Em que:

$\delta_{deflexão}$ = Ângulo de deflexão;

V = Alinhamento vertical de referência;

d_h = Distância horizontal;

Δ = Diferença linear entre os respectivos centros geométricos;

C_R = Origem ajustada do alinhamento vertical de referência;

C_{STi} = Centro geométrico ajustado de uma solda transversal i .

A Equação 119 foi aplicada para determinar deflexões dos centros específicos de cada solda transversal ao longo do ponto definido como a origem do alinhamento de referência.

$$\delta_{deflexão} = \text{tg}^{-1} \frac{\Delta}{d_h} \quad (119)$$

4 RESULTADOS E ANÁLISES DO MONITORAMENTO GEODÉSICO EM TORRES EÓLICAS ONSHORE

4.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Após a realização dos experimentos e análises metodológicas descritas no item 3 foram realizados os levantamentos dos pontos-objeto com estação total e nível digital. Os itens 4.1.1 a 4.1.6 apresentam os resultados alcançados e as respectivas análises da primeira campanha de medição.

4.1.1 Nivelamento Geométrico de Alta Precisão

No entorno da torre Gravatá 02 e da torre Gravatá 01, assim como o nivelamento e contranivelamento entre as respectivas torres, conforme ilustrado na Figura 46 do item 3.9.2.1, foram realizados circuitos (nivelamento e contranivelamento). Os resultados das linhas de nivelamento e de contranivelamento dos circuitos realizados sobre as torres Gravatá 01, Gravatá 02 e entre as torres Gravatá 02 e Gravatá 01, encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 22, Tabela 23 e Tabela 24.

Tabela 22 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito I (primeira campanha) -Torre Gravatá 02.

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01302	8.420
L2	RN01	RN03	1	-0,00252	8.490
L3	RN03	RN02	1	-0,01058	13,140
L8	RN02	RN03	1	0,01058	13,200
L9	RN03	RN01	1	0,00254	8,580
L10	RN01	RN02	1	-0,01311	9,560

Fonte: O autor (2018).

Tabela 23 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito II (primeira campanha) - Torre Gravatá 01.

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L4	RN04	RN05	1	0,00267	9.380
L5	RN05	RN06	1	-0,00022	12.310
L6	RN06	RN04	1	-0,00247	9,340
L11	RN04	RN06	1	0,00249	9,230
L12	RN06	RN05	1	0,00030	11,430
L13	RN05	RN04	1	-0,00276	8,520

Fonte: O autor (2018).

Tabela 24 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito III (primeira campanha) - Entre a Torre Gravatá 02 e Torre Gravatá 01.

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L7	RN02	RN04	15	12,66766	450,555
L14	RN04	RN02	17	-12,66943	451,255

Fonte: O autor (2018).

Após ter realizado o levantamento, foram feitos os cálculos do perímetro, erro de fechamento e tolerância dos circuitos nivelados a partir dos desníveis e distâncias medidas em campo, conforme o item 2.6.3.2. Os resultados referentes ao erro de fechamento, o perímetro e a tolerância realizados entre os pinos RN01, RN02 e RN03 no circuito I da torre Gravatá 02 são apresentados na Tabela 25, sobre os pinos RN04, RN05 e RN06 no circuito II da torre Gravatá 01 na Tabela 26 e entre as RN02 e RN04 na Tabela 27.

Tabela 25 - Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 02 (primeira campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
I	-0,00009	30,105	0,00052	0,01043	20/04/2018
I	-0,00001	31,340	0,00053	0,00063	20/04/2018

Fonte: O autor (2018).

Tabela 26 - Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 01 (primeira campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
II	-0,00003	31,030	0,00053	0,00311	20/04/2018
II	0,00003	29,180	0,00051	0,00302	20/04/2018

Fonte: O autor (2018).

Tabela 27- Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias do circuito e precisão do nivelamento realizados entre as RN02 e RN04 (primeira campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
III	-0,00178	451,260	0,00202	0,84408	20/04/2018

Fonte: O autor (2018).

O resultado do nivelamento e contranivelamento entre as RN02 e RN04 teve um erro de fechamento acima de 1 mm. Embora o resultado encontre dentro da tolerância, era esperado maior precisão devido a classificação de precisão do nível utilizado. Possivelmente, as dificuldades apresentadas (cf. item 3.10.1) prejudicaram o resultado.

4.1.1.1 Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico dos Circuitos

Os desníveis e as cotas dos circuitos (cf. item 3.9.2.1) foram ajustados através do MMQ - Modelo paramétrico (cf. item 2.10.1). Em seguida, o ajustamento dos circuitos do nivelamento é demonstrado para explicar cada item do processo.

O vetor dos valores observados (L_b) é formado pelos desníveis brutos (RN01, RN03, RN04, RN05 e RN06) obtidos das linhas niveladas, de acordo com a Equação 120.

$$L_b = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \\ L_7 \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} 0,01301 + RN02 \\ -0,00252 \\ -0,01058 - RN02 \\ 12,66765 + RN02 \\ 0,00267 \\ -0,00022 \\ -0,00247 \end{bmatrix}_m \quad (120)$$

A matriz A é formada pelos coeficientes das incógnitas das equações de observação (Equação 121 a 128), conforme a Equação 125.

$$L_1 = RN02 - RN01 \quad (121)$$

$$L_2 = RN01 - RN03 \quad (122)$$

$$L_3 = RN03 - RN02 \quad (123)$$

$$L_4 = RN02 - RN04 \quad (124)$$

$$L_5 = RN04 - RN05 \quad (125)$$

$$L_6 = RN05 - RN06 \quad (126)$$

$$L_7 = RN06 - RN04 \quad (127)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (128)$$

Os valores dos pesos foram determinados pelo inverso aos comprimentos das linhas de nivelamento de acordo com a Equação 129.

$$P = \begin{bmatrix} 1/d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/d_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/d_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/d_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/d_7 \end{bmatrix} \quad (129)$$

Em que:

$$d_1 = 0,00842 \text{ km}$$

$$d_2 = 0,00849 \text{ km}$$

$$d_3 = 0,01319 \text{ km}$$

$$d_4 = 0,45055 \text{ km}$$

$$d_5 = 0,00938 \text{ km}$$

$$d_6 = 0,01231 \text{ km}$$

$$d_7 = 0,00934 \text{ km}$$

Conforme a Equação 72, os parâmetros foram ajustados (X_a) e encontrados as cotas ajustadas. Os desníveis ajustados foram determinados de acordo com a Equação 39 e os respectivos desvios padrão dos resultados através da Equação 75. Os resultados referentes ao ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I, circuito II e circuito III estão nas Tabelas 28 a 30 e as cotas ajustadas e seus respectivos desvios padrão nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 28 – Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I (primeira campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN01	0,01304	±0,00003
RN01	RN03	-0,00250	±0,00003

Continua

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN03	RN02	-0,01054	±0,00003
RN02	RN03	0,01058	±0,00000
RN03	RN01	0,00253	±0,00001
RN01	RN02	-0,01311	±0,00001

Fonte: O autor (2018).

Tabela 29 – Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito II (primeira campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN04	RN05	0,00268	±0,00003
RN05	RN06	-0,00021	±0,00003
RN06	RN04	-0,00247	±0,00003
RN04	RN06	0,00248	±0,00001
RN06	RN05	0,00029	±0,00001
RN05	RN04	-0,00277	±0,00001

Fonte: O autor (2018).

Tabela 30– Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito III (primeira campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN04	12,66766	0,00024
RN04	RN02	-12,66943	0,00007

Fonte: O autor (2018).

Tabela 31 – Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no nivelamento (primeira campanha) – Circuito I.

Pinos	Cota Ajustadas (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01304	±0,00003
RN03	1000,01054	±0,00003
RN04	1012,66766	±0,00024

Pinos	Cota Ajustadas (m)	Desvio padrão (m)
RN05	1012,67033	±0,00024
RN06	1012,67012	±0,00024

Fonte: O autor (2018).

Tabela 32 – Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no contranivelamento (primeira campanha) – Circuito II.

Pinos	Cota Ajustadas (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01307	±0,00001
RN03	1000,01056	±0,00000
RN04	1012,66854	±0,00007
RN05	1012,67127	±0,00007
RN06	1012,67102	±0,00007

Fonte: O autor (2018).

A Tabela 33 possui a cota média e seu respectivo desvio padrão. O cálculo da cota foi realizado através da média aritmética e o desvio padrão através da Equação 130.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \sigma_i^2} \quad (130)$$

Tabela 33 – Cotas médias ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidos no nivelamento e contranivelamento (primeira campanha).

Pinos	Cota Média (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01306	±0,00004
RN03	1000,01055	±0,00004
RN04	1012,66810	±0,00031
RN05	1012,67080	±0,00032
RN06	1012,67057	±0,00032

Fonte: O autor (2018).

Os resultados apresentados na Tabela 33 mostram menores desvios padrão nos pinos da torre Gravatá 02, na casa do centésimo de milímetro, e máximos nos pinos da Torres Gravatá 01, com resultado em décimos de milímetros.

4.1.2 Método da Irradiação Tridimensional Aplicada na Torre

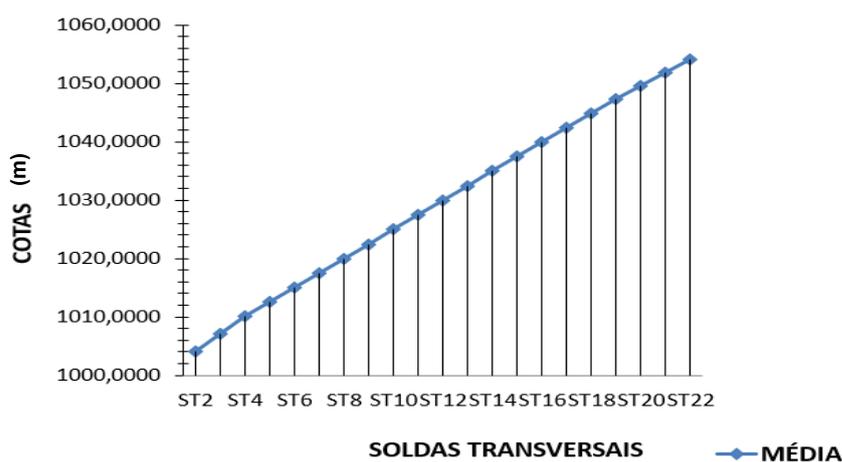
Por intermédio do método da irradiação tridimensional (cf. item 2.8.1) foram determinadas as coordenadas tridimensionais através das medições sobre os pontos de referência, dos ângulos verticais, distâncias inclinadas e direções horizontais.

Como não houve a possibilidade de implantar alvos sobre a torre, conseqüentemente, não havia de forma precisa como realizar medições na posição direta (PD) e na posição inversa (PI) da luneta dos mesmos pontos-objeto observados nas diferentes épocas de medição. Com a definição das soldas transversais, como pontos-objeto, foi necessário medir os segmentos inferiores de cada solda transversal a partir dos pontos de referência que dispusessem visadas à torre. Os valores em branco nas tabelas a seguir são referentes a indisponibilidade de visada ou devido aos problemas temporais descritos no item 3.10.1.

As cotas serviram para avaliar se as medições sobre os pontos de referência foram efetuadas em uma mesma solda transversal e realizar uma avaliação quantitativa da qualidade dos resultados. As cotas foram calculadas a partir da Equação 22 para cada medição nos pontos de referência.

Os resultados dos cálculos das cotas obtidas sobre os pontos de referência L1, L2 e L3 na posição direta (PD) e na posição inversa (PI) da luneta, considerada nesta dissertação como medições independentes, encontram-se no Apêndice. A Figura 56 ilustra o gráfico da cota média de cada solda transversal a partir das medições realizadas nos vértices do triângulo equilátero L1, L2 e L3.

Figura 56 – Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de L1, L2 e L3 (primeira campanha).



Fonte: O autor (2018).

Como descrito no item 3.10.1, houveram problemas devido ao mau tempo que atrapalharam os levantamentos. As medições por meio do método da irradiação tridimensional a partir dos pontos de referência localizados no hexágono, foram realizadas apenas a partir dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3. Os resultados dos cálculos das cotas das soldas transversais e adesivos refletivos (AR) obtidos estão no Apêndice. A Figura 57 mostra o gráfico da cota média de cada solda transversal e adesivos refletivos a partir das medições realizadas nos vértices do hexágono regular LP1, LP2 e LP3.

Figura 57 – Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de LP1, LP2 e LP3 (primeira campanha).



Fonte: O autor (2018).

Para realizar as medidas de dispersão dos resultados das cotas foram realizados os cálculos dos valores máximo e mínimo, amplitude (Equação 131), média (Equação 132), variância (Equação 133), desvio-padrão (Equação 134) e coeficiente de variação (Equação 135). A Tabela 34 consta os resultados das medidas de dispersão dos pontos-objeto localizados nas soldas transversais e medições a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e a Tabela 35 apresenta os resultados obtidos a partir das medições realizadas sobre os pontos de referência LP1, LP2 e LP3.

$$\text{Amplitude} = Cota_{\text{máxima}} - Cota_{\text{mínima}} \quad (131)$$

$$Cota_{\text{média}} = \frac{Cota_{ST1} + Cota_{ST2} + Cota_{ST3} + \dots + Cota_{STn}}{n} \quad (132)$$

$$\sigma^2 = \frac{(Cota_{ST1} - Cota_{\text{média}})^2 + (Cota_{ST2} - Cota_{\text{média}})^2 + \dots + (Cota_{STn} - Cota_{\text{média}})^2}{n-1} \quad (133)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (134)$$

$$CV = \frac{\sigma}{Cota_{m\u00e9dia}} \cdot 100 \quad (135)$$

Contudo, ainda que os resultados demonstrem varia\u00e7\u00f5es centim\u00e9tricas das cotas, \u00e9 aceit\u00e1vel afirmar que as medi\u00e7\u00f5es realizadas nos pontos de refer\u00eancia foram realizadas nas mesmas soldas transversais, em virtude de o raio da torre variar a partir de cotas superiores as obtidas nas medidas de dispers\u00e3o.

Tabela 34 - Medidas de dispers\u00e3o da primeira campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de refer\u00eancia L1, L2 e L3.

ST	M\u00e1ximo (m)	M\u00ednimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{m\u00e9dia}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\pm\sigma(m)$	CV (%)
ST2	1004,11994	1004,07905	0,04088	1004,11042	0,00024	0,01565	0,00156
ST3	1007,08784	1007,04809	0,03974	1007,07116	0,00020	0,01406	0,00140
ST4	1010,05397	1010,01914	0,03483	1010,04217	0,00021	0,01443	0,00143
ST5	1012,52926	1012,50099	0,02827	1012,52092	0,00013	0,01146	0,00113
ST6	1015,02121	1014,98735	0,03385	1015,00626	0,00014	0,01199	0,00118
ST7	1017,51690	1017,46454	0,05235	1017,49264	0,00031	0,01749	0,00172
ST8	1019,97642	1019,94125	0,03516	1019,96123	0,00019	0,01385	0,00136
ST9	1022,47400	1022,43705	0,03696	1022,46029	0,00020	0,01412	0,00138
ST10	1025,04597	1025,01032	0,03565	1025,03005	0,00016	0,01261	0,00123
ST11	1027,52578	1027,48591	0,03988	1027,51107	0,00020	0,01421	0,00138
ST12	1029,99987	1029,96751	0,03236	1029,98533	0,00014	0,01197	0,00116
ST13	1032,48843	1032,45347	0,03496	1032,47237	0,00023	0,01512	0,00146
ST14	1034,96396	1034,92394	0,04003	1034,94804	0,00025	0,01589	0,00154
ST15	1037,44924	1037,40741	0,04183	1037,43024	0,00024	0,01559	0,00150
ST16	1039,92723	1039,89505	0,03218	1039,91011	0,00013	0,01149	0,00110
ST17	1042,42093	1042,36913	0,05179	1042,39527	0,00032	0,01796	0,00172
ST18	1044,87644	1044,84417	0,03227	1044,85794	0,00014	0,01194	0,00114
ST19	1047,23312	1047,19124	0,04188	1047,21436	0,00024	0,01564	0,00149
ST20	1049,50918	1049,47357	0,03561	1049,49550	0,00020	0,01417	0,00135
ST21	1051,79075	1051,76448	0,02627	1051,77399	0,00009	0,00962	0,00091
ST22	1054,07583	1054,05085	0,02498	1054,06292	0,00011	0,01054	0,00100

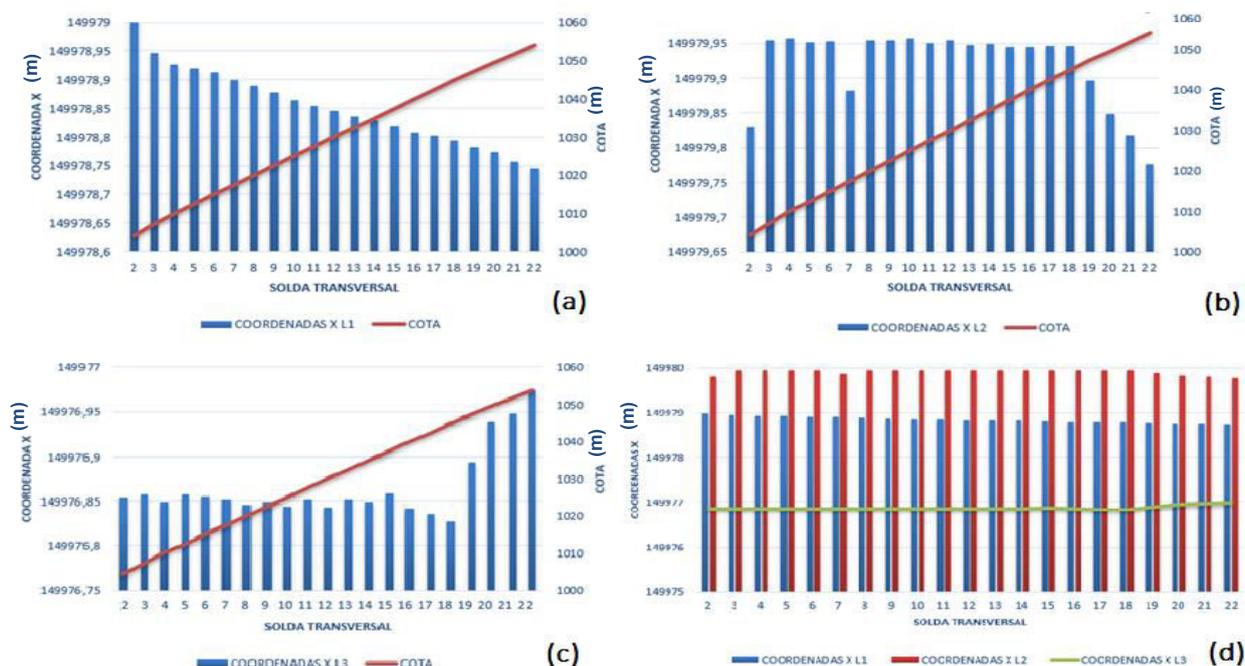
Fonte: O autor (2018).

Tabela 35 - Medidas de dispersão da primeira campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\pm\sigma(m)$	CV (%)
ST1	1001,14487	1001,11686	0,02802	1001,13257	0,00017	0,01319	0,00132
ST2	1004,14422	1004,09761	0,04661	1004,12112	0,00032	0,01789	0,00178
ST3	1007,10679	1007,06350	0,04328	1007,08558	0,00029	0,01716	0,00170
ST4	1010,08001	1010,03404	0,04597	1010,05738	0,00031	0,01771	0,00175
ST5	1012,55754	1012,51124	0,04630	1012,53462	0,00032	0,01780	0,00176

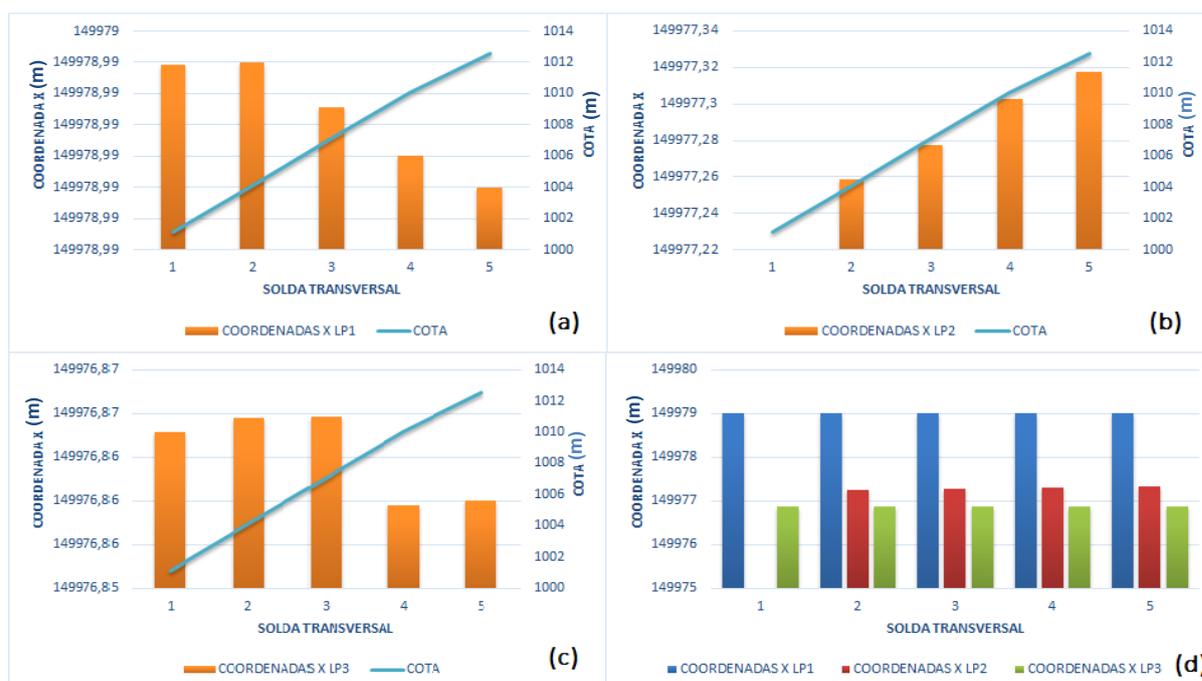
As coordenadas x e y foram calculadas a partir da Equação 20 e Equação 21, respectivamente, em cada medição nos pontos de referência. Os valores das coordenadas x das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3, em LP1, LP2 e LP3 e as respectivas medidas de dispersões, apresentam-se desagregados ao final da dissertação no Apêndice. A Figura 58 ilustra os gráficos das coordenadas médias x das soldas transversais L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d) e a Figura 59 ilustra os gráficos das coordenadas médias x a partir dos pontos LP1 (a), LP2 (b), LP3 (c) e o agrupamento (d).

Figura 58 – Média das Coordenadas x (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d).



Fonte: O autor (2018).

Figura 59 – Média das Coordenadas x (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): LP1 (a), LP2 (b), LP3 (c) e o agrupamento (d).



Fonte: O autor (2018).

Em uma avaliação geral da figura 58, verifica-se resultados incoerentes em ST2, uma vez que as coordenadas deveriam possuir diferenças em milímetros em relação a ST3 por estarem próximas a base. Os resultados das coordenadas x medidas sobre o ponto de referência L1 (Figura 58 (a)) apresentam um decréscimo gradual a partir da ST2 até a ST22, em L2 (Figura 58 (b)) possuem baixa variação da ST3 até a ST18, desconsiderando ST7, com decréscimo à partir da ST19 até ST22 e sobre o ponto de referência L3 (Figura 58 (c)) possuem uma amplitude mínima da ST2 até a ST18 com crescimento gradual da ST19 até ST22.

Os resultados da média das coordenadas x sobre LP1, LP2 e LP3 (Figura 59) apresentam variações discrepantes, em virtude de possuir um decréscimo milimétrico da ST2 até a ST5 sobre LP1 (Figura 59 (a)), crescimento centimétrico da ST2 até a ST5 sobre LP2 (Figura 59 (b)) e com decréscimo milimétrico da ST3 a ST5 sobre LP3 (Figura 59 (c)).

Todos os resultados das coordenadas e dos pontos-objeto a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3, os valores das coordenadas e a partir de LP1, LP2 e LP3 e as medidas de dispersão L1, L2, L3, LP1, LP2 e LP3 estão no Apêndice. Os resultados das coordenadas médias e estão expressos visualmente na Figura 60 (L1, L2 e L3) e na Figura 61 (LP1, LP2 e LP3).

Figura 60 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d).



Fonte: O autor (2018).

Figura 61 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Primeira campanha): LP1 (a), LP2 (b), LP3 (c) e o agrupamento (d).



Fonte: O autor (2018).

Conforme a figura 60, os resultados em ST2 mantem-se incoerente, pois as coordenadas possuem diferenças em centímetros com relação a ST3. As coordenadas y e medidas sobre o ponto de referência L1 (Figura 60 (a)) possuem um

crescimento gradual a partir da ST2 até a ST22, em L2 (Figura 60 (b)) tem baixa variação da ST3 até a ST18, desconsiderando ST7, com decréscimo à partir da ST19 até ST22 e sobre o ponto de referência L3 (Figura 60 (c)) possuem uma amplitude mínima da ST2 até a ST16 com crescimento de ST17 até ST19 e decréscimo de ST20 até ST22.

A média das coordenadas y sobre LP1, LP2 e LP3 (Figura 61) apresentam variações discrepantes, em virtude de possuírem uma crescente variação centimétrica da ST2 até a ST5 sobre LP1 (Figura 59 (a)), da ST2 até a ST5 sobre LP2 (Figura 61 (b)) e com crescimento milimétrico da ST3 a ST5 sobre LP3 (Figura 61 (c)).

Ao avaliar os resultados das medidas de dispersão das coordenadas x e y obtidas sobre os pontos de referência L1, L2, L3, LP1, LP2 e LP3, verifica-se valores discrepantes obtidos sobre os pontos de referência L1 e LP2. As medições nesse ponto de referência foram o que mais sofreram com problemas relacionados a forte chuva e vibrações provenientes da pressão que o vento exerceu sobre a torre. Além disso, os pontos foram plotados no software AutoCAD e auxiliaram na determinação dos pontos que não seriam utilizados para o ajustamento das observações.

4.1.3 Ajustamento MMQ - Modelo Combinado das Seções Circulares da Torre

Para o estudo da variação, principalmente quanto à geometria da torre, foi essencial determinar o raio e as coordenadas do centro de cada solda transversal. O modelo matemático onde há a possibilidade do cálculo dessa grandeza é através da equação da circunferência (Equação 136), que envolve as coordenadas medidas, as coordenadas do centro e o raio da circunferência.

$$(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 - R^2 = 0 \quad (136)$$

Onde:

x_1, y_1 = Coordenadas medidas;

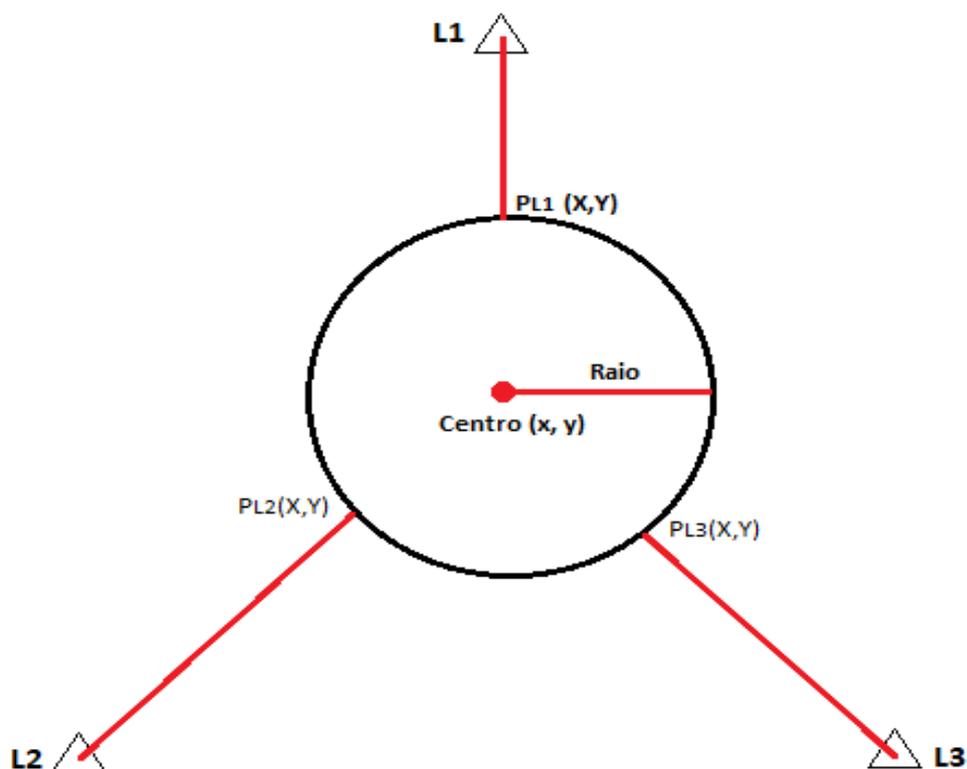
x_c, y_c = Coordenadas do centro;

R^2 = Raio da solda transversa

A Figura 62 exemplifica o método. As coordenadas do centro (x, y) e raio da seção circular da solda transversal são determinadas a partir das medições das coordenadas (x, y) do círculo sobre os alinhamentos dos pontos de referência.

Neste modelo se tem três incógnitas e o mínimo de quatro equações, o que permite proceder ao ajustamento. Observa-se ainda que incógnitas e observações não podem ser separadas pelo sinal de igualdade. Assim, o ajustamento é feito pelo MMQ - modelo combinado (cf. item 2.10.2).

Figura 62 – Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x, y) e raio da seção circular da solda transversal através do MMQ modelo combinado.



Fonte: O autor (2018).

Para exemplificar a metodologia, são utilizados os dados referentes as medições da solda transversal ST9 a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 (Figura 62).

O vetor dos valores observados (L_b) é formado pelas coordenadas (x, y) obtidas através das leituras realizadas na posição direta e inversa da luneta em cada solda transversal, sendo consideradas leituras independentes, devido à incerteza de realizar a pontaria no mesmo ponto. Para esse exemplo foi desconsiderado a leitura L1(PI) devido aos problemas descritos no item 3.10.1. A Equação 137 é demonstra o vetor L_b .

$$L_b = \begin{bmatrix} X_{L3(PD)} \\ Y_{L3(PD)} \\ X_{L3(PI)} \\ Y_{L3(PI)} \\ X_{L2(PD)} \\ Y_{L2(PD)} \\ X_{L2(PI)} \\ Y_{L2(PI)} \\ X_{L1(PD)} \\ Y_{L1(PD)} \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} 149976,89304 \\ 250100,18603 \\ 149976,80919 \\ 250100,21236 \\ 149979,96591 \\ 250100,89450 \\ 149979,01030 \\ 250097,84252 \\ 149979,00005 \\ 250097,88350 \end{bmatrix}_m \quad (137)$$

A adoção dos parâmetros aproximados para determinar as coordenadas do ponto central, foi realizado através da média das coordenadas observadas e a distância até o centro da solda transversal inicial (Tabela 36).

Tabela 36 - Parâmetros aproximados das coordenadas do centro da solda transversal e raio.

Parâmetros Aproximados		
x_0 (m)	y_0 (m)	R_0 (m)
149978,60350	250099,63870	2,50000

Fonte: O autor (2018).

A Equação 138 é o vetor dos valores aproximados dos parâmetros.

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ R_0 \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} 149978,60350 \\ 250099,63870 \\ 2,50000 \end{bmatrix}_m \quad (138)$$

As matrizes a seguir encontram-se através de processos numéricos iterativo para conseguir a solução otimizada. Os valores são referentes ao primeiro processo iterativo. A Equação 139 é referente ao cálculo do vetor W.

$$W = \begin{bmatrix} (X_{L3(PD)} - x_0)^2 + (Y_{L3(PD)} - x_0)^2 - R_0^2 \\ (X_{L3(PI)} - x_0)^2 + (Y_{L3(PI)} - x_0)^2 - R_0^2 \\ (X_{L2(PD)} - x_0)^2 + (Y_{L2(PD)} - x_0)^2 - R_0^2 \\ (X_{L2(PI)} - x_0)^2 + (Y_{L2(PI)} - x_0)^2 - R_0^2 \\ (X_{L1(PD)} - x_0)^2 + (Y_{L1(PD)} - x_0)^2 - R_0^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,81018 \\ -2,91801 \\ -2,81535 \\ -2,96039 \\ -2,90931 \end{bmatrix} \quad (139)$$

O Cálculo das Matriz A (Equação 143) é referente as derivadas parciais da função em relação aos parâmetros, conforme as Equações 140 a 142.

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_0} = -2 (X_i - x_0) \quad (140)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial y_0} = -2 (Y_i - x_0) \quad (141)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial R_0} = -2 R_0 \quad (142)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_{L3(PD)}} & \frac{\partial f_1}{\partial Y_{L3(PD)}} & \frac{\partial f_1}{\partial R_0} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_{L3(PI)}} & \frac{\partial f_2}{\partial Y_{L3(PI)}} & \frac{\partial f_2}{\partial R_0} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X_{L2(PD)}} & \frac{\partial f_3}{\partial Y_{L2(PD)}} & \frac{\partial f_3}{\partial R_0} \\ \frac{\partial f_4}{\partial X_{L2(PI)}} & \frac{\partial f_4}{\partial Y_{L2(PI)}} & \frac{\partial f_4}{\partial R_0} \\ \frac{\partial f_5}{\partial X_{L1(PD)}} & \frac{\partial f_5}{\partial Y_{L1(PD)}} & \frac{\partial f_5}{\partial R_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,53310 & -1,12962 & -5 \\ 3,47709 & -1,11257 & -5 \\ -2,72540 & -2,51213 & -5 \\ -0,80142 & 3,53782 & -5 \\ -0,80541 & 3,56568 & -5 \end{bmatrix} \quad (143)$$

O cálculo da matriz B foi realizado através da Equação 144.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_{L3(PD)}} & \frac{\partial f_1}{\partial Y_{L3(PD)}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_2}{\partial X_{L3(PI)}} & \frac{\partial f_2}{\partial Y_{L3(PI)}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_3}{\partial X_{L2(PD)}} & \frac{\partial f_3}{\partial Y_{L2(PD)}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_4}{\partial X_{L2(PI)}} & \frac{\partial f_4}{\partial Y_{L2(PI)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_5}{\partial X_{L1(PD)}} & \frac{\partial f_5}{\partial Y_{L1(PD)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,53316 & 1,12962 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3,47710 & 1,11258 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,72540 & 2,51212 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80142 & -3,53782 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,80541 & -3,56567 \end{bmatrix} \quad (144)$$

A matriz dos pesos é calculada multiplicando-se a Matriz Variância Covariância das observações invertidas pelo sigma *a priori*. A Matriz Variância Covariância é composta pela propagação dos erros dos pontos de referência (cf. item 2.10.3.2). Para os pontos de referência L1, L2, L3 e LP3 os desvios-padrão das coordenadas foram obtidos através do levantamento GNSS, de acordo com a Tabela 37. O resultado dos desvios-padrão das coordenadas (x, y), obtidos a partir da propagação por estação total, dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3, encontram-se no apêndice.

Tabela 37 - Desvios padrão planimétrico para os pontos de referência L1, L2, L3 e LP3.

σ_x (m)	σ_y (m)	$\sigma_{\text{planimétrico}}$ (m)
$\pm 0,00600$	$\pm 0,00700$	± 0.00921

Fonte: O autor (2018).

O cálculo da matriz P foi formada com as variâncias planimétricas proporcionais as coordenadas (x, y) das medições, de acordo com a Equação 145.

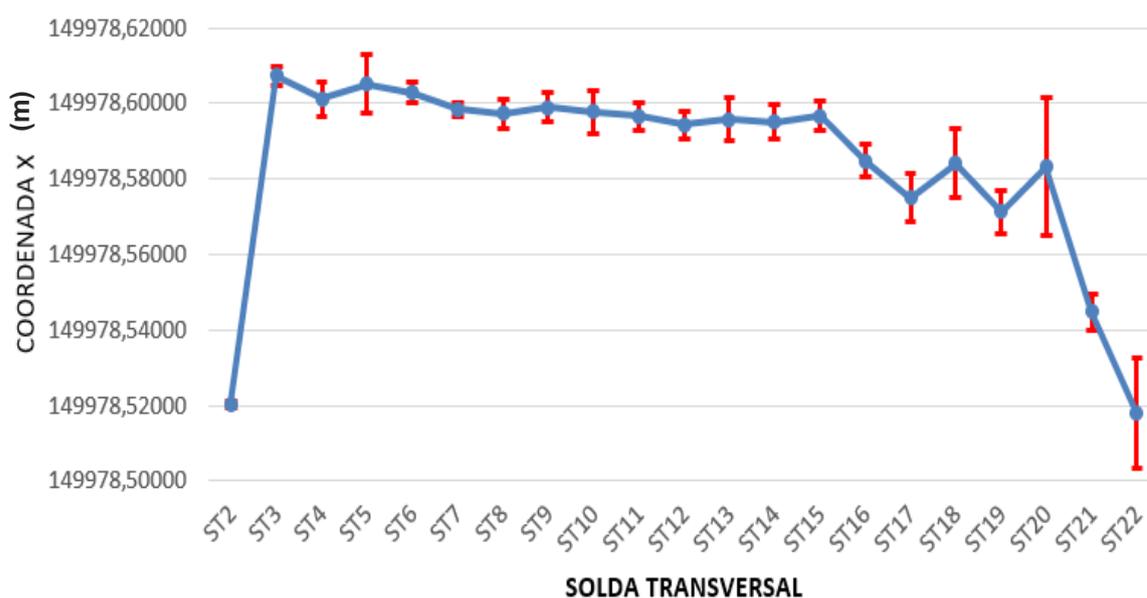
$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{planL3(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{planL3(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{planL3(PI)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL3(PI)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL2(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL2(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL2(PI)}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL2(PI)}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL1(PD)}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL1(PD)}}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (145)$$

Os parâmetros (X) foram calculados através da Equação 60 e os parâmetros ajustados (X_a) com a Equação 62. Posteriormente, os cálculos dos valores observados ajustados (L_a) e resíduos (V) ocorreram, respectivamente, através das Equações 65 e 64. Após o método iterativo atingir a condição ideal, os resultados das coordenadas (x, y) e os raios passaram pelos testes estatísticos (cf. item 2.11).

Conforme comentado no item 4.1.2, os valores medidos das soldas transversais foram analisados e os pontos considerados discrepantes não foram utilizados no ajustamento. Foram realizados testes para identificação das observações com erros grosseiros (cf. item 2.11.3) e os testes de hipótese (cf. item 2.11.2), através do Teste Global Qui-Quadrado (χ^2), utilizando o teste bilateral e ao nível de significância de 5%, com grau de liberdade igual a 2 com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,051 < \chi^2 < 7,378$. Os resultados dos raios e das coordenadas x e y do centro das seções circulares formadas por cada solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e de LP1, LP2 e LP3, encontra-se no Apêndice.

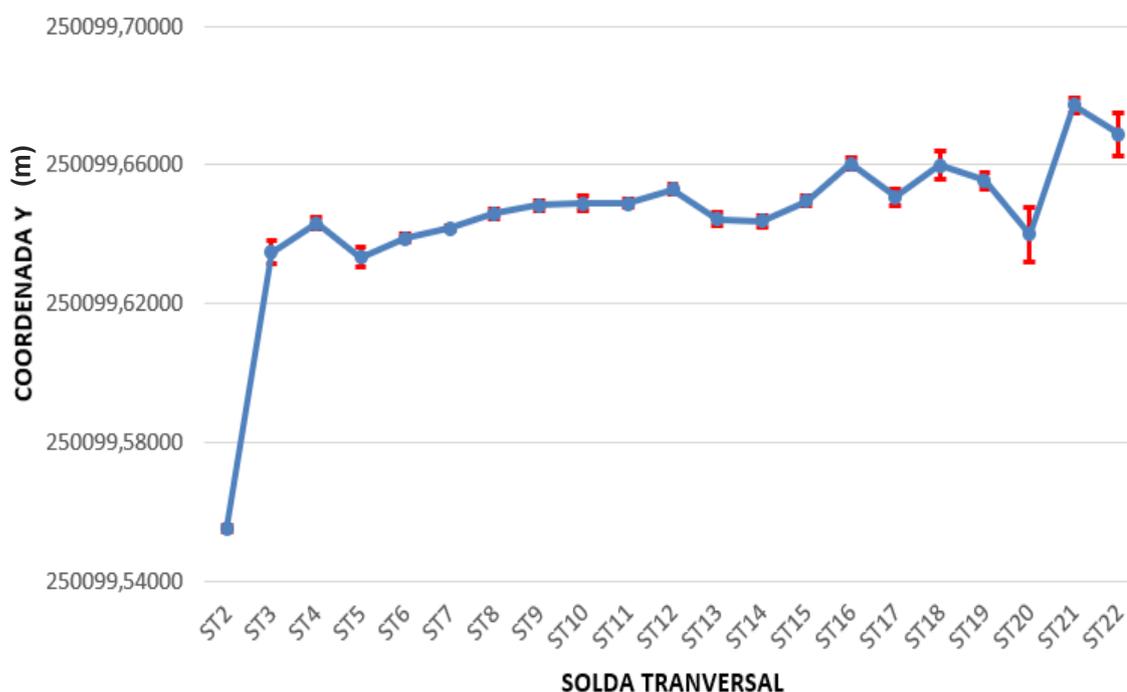
Os resultados de L1, L2 e L3 são ilustrados nas Figuras 63 e 64, respectivamente, das coordenadas x e y com seus desvios padrão e desde LP1, LP2 e LP3 na Figura 65.

Figura 63– Modelo combinado: Coordenadas x da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

Figura 64 – Modelo combinado: Coordenadas y da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.

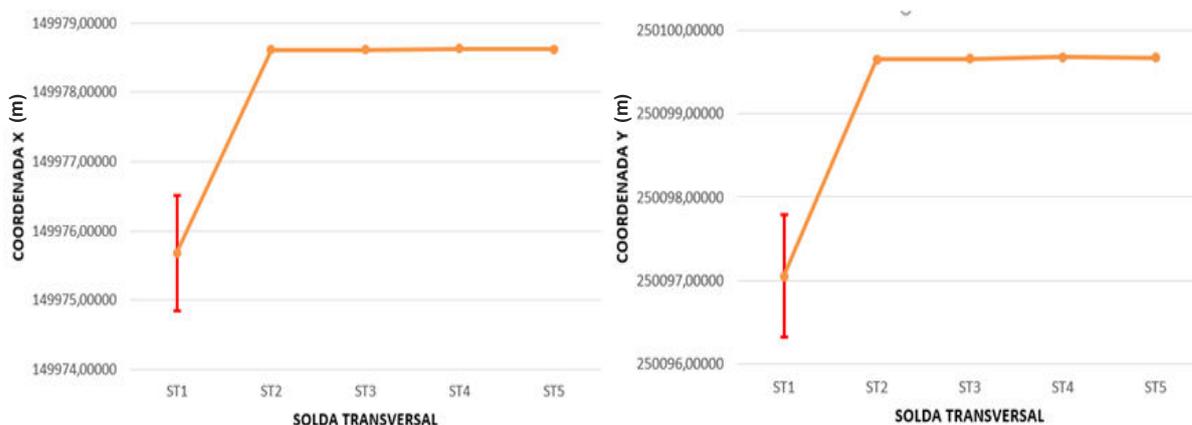


Fonte: O autor (2018).

Segundo a Figura 63, a coordenada x da ST2 é divergente, visto que apresenta uma diferença de 8 cm em relação a ST3. Da ST3 até ST15, as coordenadas apresentam uma variação decrescente com máxima de 8 mm. A partir de ST16, as coordenadas x apresentam variações em centímetros, com uma oscilação nos resultados da ST18 e ST20 em relação a tendência apresentada, possivelmente devido ao movimento da torre na parte superior. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST20 e ST22 com $\pm 0,01823$ m e $\pm 0,01482$ m, respectivamente (cf. Apêndice U).

Na Figura 64, a coordenada y da ST2 diverge em 8 cm da ST3, assim como ocorrido na coordenada x. O desvio padrão médio (cf. Apêndice U) da ST3 até ST18 é de $\pm 0,01441$ m, com maior desvio padrão de $\pm 0,00408$ m em ST18. As coordenadas y da ST3 até ST18 apresentam uma variação crescente, com discrepâncias da tendência na ST13, ST14, ST15 e ST17. A partir da ST19 há uma oscilação nos resultados das coordenadas y do centro das soldas transversais, com valores decrescentes e desvios padrão de $\pm 0,00789$ m e $\pm 0,00616$ m, respectivamente, de ST20 e ST22.

Figura 65 – Modelo combinado: Coordenadas x e y da primeira campanha a partir dos pontos LP1, LP2 e LP3.

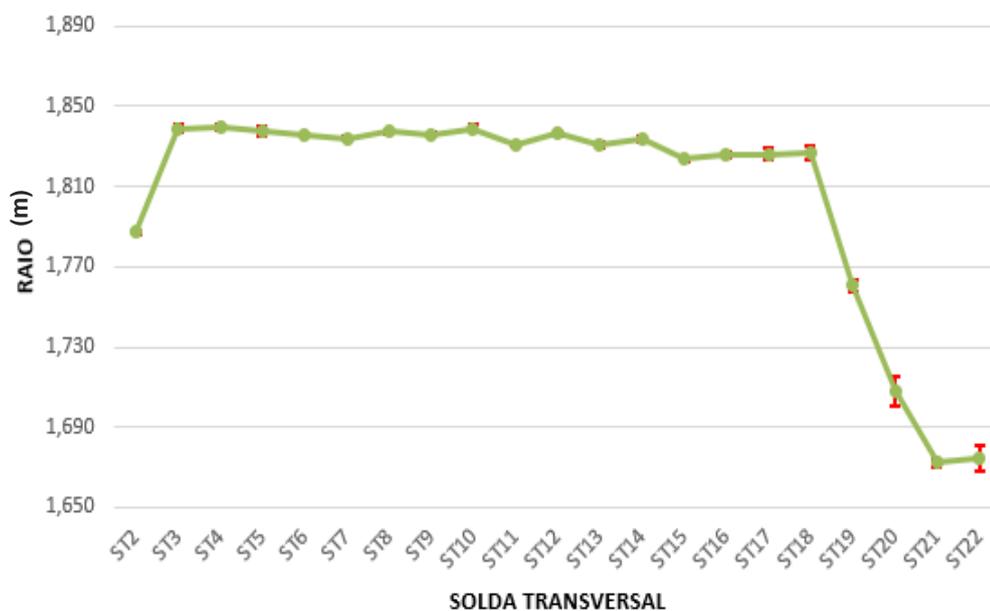


Fonte: O autor (2018).

De acordo com a Figura 65, as coordenadas x e y da ST1 foram desconsideradas por apresentarem resultados dissonantes das demais soldas transversais.

Os raios dos centros das seções circulares e os desvios padrão obtidos a partir de L1, L2 e L3 estão na Figura 66 e desde LP1, LP2 e LP3 na Figura 67.

Figura 66 – Raios das seções circulares da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

Figura 67 – Raios das seções circulares da primeira campanha a partir dos pontos LP1, LP2 e LP3.



Fonte: O autor (2018).

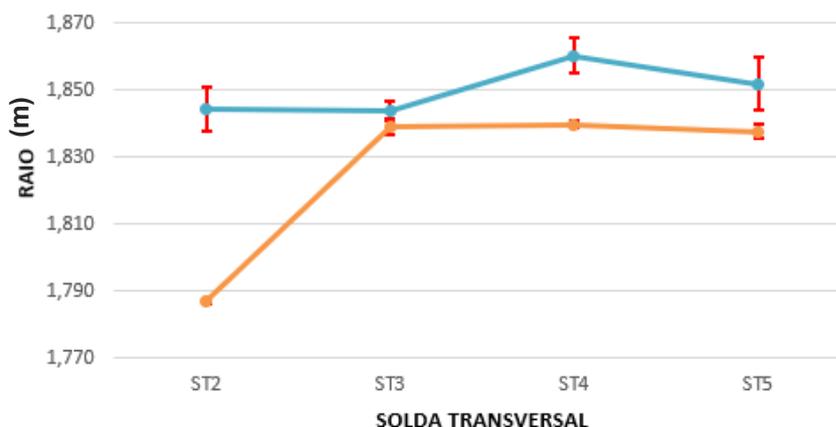
Na Figura 66 são apresentadas os raios das seções circulares das soldas transversais oriundas das medições sobre os pontos de referência L1, L2 e L3. O raio da ST2 é menor com uma diferença média de 5 cm em relação a ST3, ST4 e ST5, sendo um resultado incoerente, pois deveria possuir valor igual ou maior que a soldas transversais superiores. O desvio padrão médio (cf. Apêndice V) da ST3 até ST18 é de $\pm 0,00174$ m, com maior desvio padrão de $\pm 0,00366$ m em ST18. A partir da ST19 há uma acentuada diminuição do raio com média de $\pm 0,03154$ m.

Conforme a Figura 67 e o Apêndice W, o raio da seção circular da solda transversal ST1 é maior em relação a ST2, ST3, ST4 e ST5 com uma diferença média de 1,56 m, sendo um resultado discrepante. Os raios de ST2 a ST5 apresentam um desvio padrão médio de $\pm 0,00552$ m e diferença máxima de 0,01618 m entre ST2 e ST4.

Ainda que o resultado das coordenadas (x, y) e raio da solda transversal ST2 sobre os pontos de referência L1, L2 e L3 não ser rejeitado no teste de hipótese, seus valores são divergente e foram descartados. Os resultados obtidos sobre os pontos de referência LP1, LP2 e LP3 não foram satisfatórios. A tendência dos raios das soldas transversais é serem iguais ou menores com o aumento da cota. Os resultados dos raios das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 apresentaram melhor essa tendência. Após avaliar o comportamento das coordenadas e raio (Figura 68), foram utilizados apenas as coordenadas das seções

circulares obtidas através das medições em L1, L2 e L3 para definir o alinhamento vertical de referência (cf. item 3.11).

Figura 68 – Comparativos dos raios de ST2 a ST5 (primeira campanha).



Fonte: O autor (2018).

4.1.4 Método de Medição de Bordas Aplicada na Torre

A determinação das coordenadas do centro de cada solda transversal foram realizadas a partir das leituras na borda esquerda e borda direita, de acordo com o item 2.8.3. Os resultados direção horizontal do centro de cada solda transversal medida a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e medida a partir dos pontos LP1 e LP2, encontram-se no Apêndice.

O resultado do azimute do centro de cada solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3, encontra-se na Tabela 38 e medida a partir do ponto LP1 e LP2 na Tabela 39.

Tabela 38 – Azimutes referentes a direção horizontal da solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 da primeira campanha.

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST2	347°53'26.12"	347°53'6.13"	227°41'6.59"	227°41'42.60"	107°50'48.74"	107°50'59.24"
ST3	347°53'21.62"	347°53'16.63"	227°41'5.60"	227°41'36.60"	107°50'48.74"	107°50'58.74"
ST4	347°53'26.62"	347°53'16.13"	227°41'0.10"	227°41'35.59"	107°50'52.24"	107°50'57.24"
ST5	347°53'25.61"	347°53'25.63"	227°41'55.10"	227°41'24.10"	107°50'56.24"	107°50'7.74"

Continua

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST6	347°53'26.12"	347°53'59.63"	227°41'49.59"	227°41'27.60"	107°50'55.24"	107°50'49.24"
ST7	347°53'25.15"	347°53'25.13"	227°41'45.59"	227°41'32.10"	107°50'54.24"	107°50'59.74"
ST8	347°53'24.14"	347°53'22.13"	227°41'39.09"	227°41'33.61"	107°50'48.24"	107°50'51.74"
ST9	347°53'11.14"	347°53'20.63"	227°41'30.09"	227°40'55.59"	107°50'41.24"	107°50'52.74"
ST10	—	—	227°41'31.59"	227°40'58.11"	107°50'33.74"	107°50'36.24"
ST11	—	—	227°41'24.60"	227°40'45.08"	107°50'32.74"	107°50'43.74"
ST12	—	—	227°41'23.60"	227°40'28.09"	107°50'28.74"	107°50'7.74"
ST13	—	—	227°41'29.60"	227°40'33.59"	107°50'14.74"	107°50'11.24"
ST14	347°52'48.14"	347°53' 6.63"	227°41'52.10"	227°40'18.08"	107°50'13.24"	107°50'59.24"
ST15	—	—	227°41'32.60"	227°40'35.11"	107°50'11.24"	107°50'58.74"
ST16	—	—	227°41'30.09"	227°40'28.09"	107°50'15.24"	—
ST17	—	—	227°41'29.10"	227°39'45.61"	107°50'7.24"	—
ST18	347°52'37.63"	347°53'58.60"	227°41'9.60"	227°39'58.60"	107°50'43.24"	—
ST19	—	—	227°41'0.59"	227°40'7.60"	107°50'7.74"	—
ST20	—	—	227°41'59.60"	227°40' 23.08"	107°50'56.24"	—
ST21	—	—	227°41'35.60"	227°39'54.10"	107°50'0.74"	—
ST22	347°50'57.13"	—	227°41'6.59"	227°39' 21.60"	107°50'0.74"	—
ST23	—	—	—	—	107°50'57.24"	—
ST24	—	—	—	—	107°50'57.24"	—

Fonte: O autor (2018).

Tabela 39 – Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP1 e LP2 (primeira campanha).

ST	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)
ST1	347°52'34.02"	347°52'36.03"		
ST2	347°52'42.03"	347°52'45.53"	47°57'24.06"	47°57'21.56"
ST3	347°52'27.03"	347°52'37.03"	47°57'24.06"	47°57'21.56"
ST4	347°52'29.02"	347°52'27.03"	47°57'5.56"	47°57'3.06"
ST5	347°52'18.53"	347°52'23.53"	47°57'41.56"	47°57'39.06"

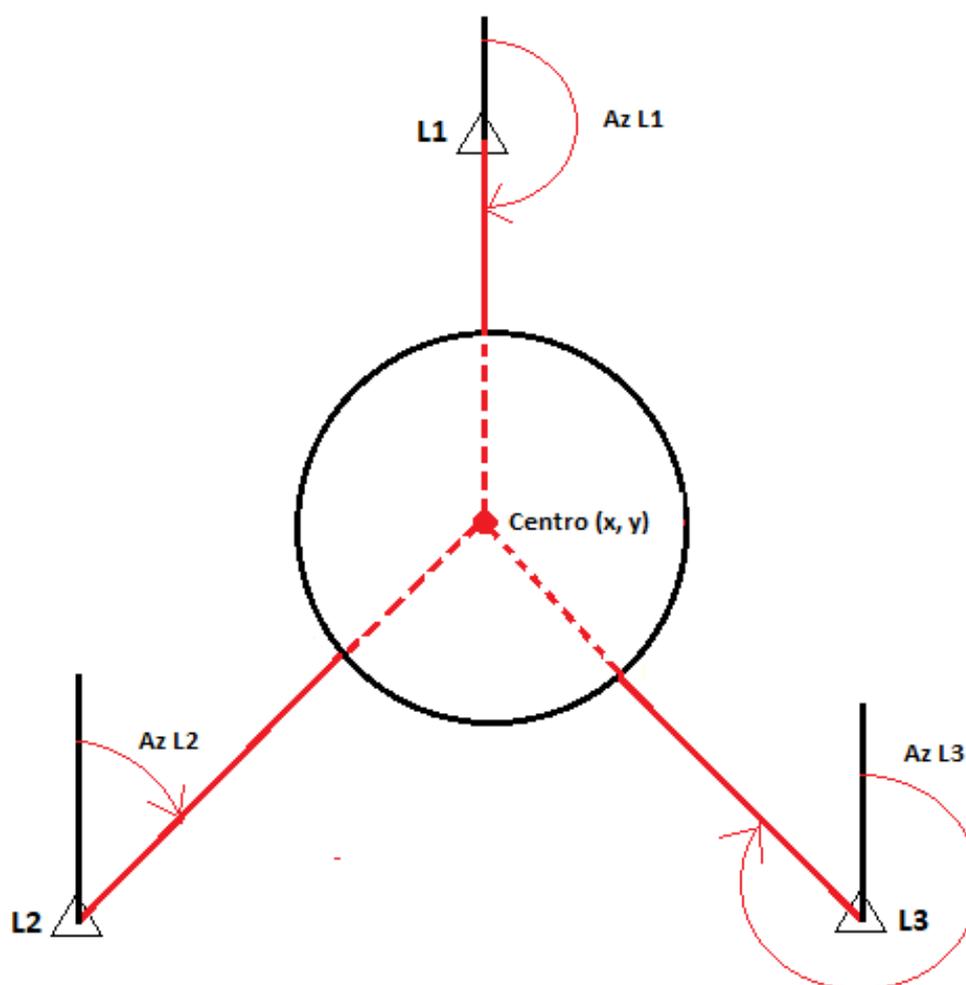
Fonte: O autor (2018).

4.1.5 Ajustamento MMQ- Modelo Paramétrico das Seções Circulares da Torre

Através do MMQ - modelo paramétrico (cf. item 2.10.1) e baseado no método da interseção à vante (cf. item 2.8.2) foi determinado as coordenadas do centro (x, y)

de cada solda transversal, por meio das direções horizontais obtidos no método de medição de bordas (cf. item 2.8.3). Assim, as coordenadas do centro (x, y) são determinadas pelo MMQ mediante o modelo paramétrico. A Figura 69 ilustra a metodologia.

Figura 69 – Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x, y) da seção circular da solda transversal através do método paramétrico.



Fonte: O autor (2018).

Em que:

x, y = Coordenadas do centro circular da solda transversal;

$A_z L1, A_z L2$ e $A_z L3$ = Azimutes.

O ajustamento é baseado em um caso que está descrito em Kahmen e Faig (1988) e as medições da solda transversal ST9 a partir dos pontos de referência L1,

L2 e L3 são usados como exemplificação metodológica para os ajustamentos realizados.

O vetor dos valores observados (L_b) é formado pelos azimutes das direções horizontais. As medições foram realizadas na posição direta e inversa da luneta em cada solda transversal, sendo consideradas leituras independentes, foi descartada a leitura L1(PI) devido a problemas descritos no item 3.10.1. A Equação 146 é o vetor L_b formado por azimutes em graus decimais.

$$L_b = \begin{bmatrix} Az_{L3(PD)} \\ Az_{L3(PI)} \\ Az_{L2(PD)} \\ Az_{L2(PI)} \\ Az_{L1(PD)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 107,84480 \\ 107,84799 \\ 227,69419 \\ 227,68211 \\ 347,88643 \end{bmatrix} \quad (146)$$

Os parâmetros aproximados (x_0, y_0) foi determinado conforme o item 4.1.3 e estão na Equação 147.

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} 149978,60350 \\ 250099,63870 \end{bmatrix}_m \quad (147)$$

As matrizes a seguir encontram-se através de processos numéricos iterativo para conseguir a solução otimizada. Os valores são referentes ao primeiro processo iterativo. O Vetor dos valores observados (L) (Equação 40) foi determinado pela diferença (Equação 150) entre os azimutes observados (L_b) (Equação 148) e os azimutes calculados (L_0) pela Equação 149.

$$Az_i = tg^{-1} \frac{x_0 - x_{PRi}}{y_0 - y_{PRi}} \quad (148)$$

Em que:

x_{PRi}, y_{PRi} = Coordenadas do ponto de referência.

$$L_0 = \begin{bmatrix} Az_{L3cal(PD)} \\ Az_{L3cal(PI)} \\ Az_{L2cal(PD)} \\ Az_{L2cal(PI)} \\ Az_{L1cal(PD)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 107,84476 \\ 107,84476 \\ 227,68426 \\ 227,68426 \\ 347,88546 \end{bmatrix} \quad (149)$$

$$L = \begin{bmatrix} AZ_{L3cal}(PD) - AZ_{L3}(PD) \\ AZ_{L3cal}(PI) - AZ_{L3}(PI) \\ AZ_{L2cal}(PD) - AZ_{L2}(PD) \\ AZ_{L2cal}(PI) - AZ_{L2}(PI) \\ AZ_{L1cal}(PD) - AZ_{L1}(PD) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00003 \\ -0,00322 \\ -0,00993 \\ -0,00214 \\ -0,00096 \end{bmatrix} \quad (150)$$

A matriz dos coeficientes (A) (Equação 152 e Equação 155) é do tipo não linear. Deste modo, foi determinado as derivadas da Equação 151 em relação a x_0 e y_0 (Equação 153 e Equação 154) e foram substituídos os valores dos parâmetros aproximados.

$$s_i = \sqrt{(x_0 - x_{Pri})^2 + (y_0 - y_{Pri})^2} \quad (151)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} \end{bmatrix} \quad (152)$$

$$a_{i1} = \frac{y_0 - y_{Pri}}{s_i^2} \frac{180^\circ}{\pi} \quad (153)$$

$$a_{i2} = -\frac{x_0 - x_{Pri}}{s_i^2} \frac{180^\circ}{\pi} \quad (154)$$

Em que:

s_i = Distância entre o ponto de referência e o centro da torre;

a_{i1} , a_{i2} = Derivadas resultantes em relação a x_0 e y_0 respectivamente.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{L3}(PD)} & \frac{\partial f_1}{\partial y_{L3}(PD)} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{L3}(PI)} & \frac{\partial f_2}{\partial y_{L3}(PI)} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_{L2}(PD)} & \frac{\partial f_3}{\partial y_{L2}(PD)} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_{L2}(PI)} & \frac{\partial f_4}{\partial y_{L2}(PI)} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_{L1}(PD)} & \frac{\partial f_5}{\partial y_{L1}(PD)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,17213 & -0,53467 \\ -0,17213 & -0,53467 \\ -0,37914 & 0,41644 \\ -0,37914 & 0,41644 \\ 0,54966 & 0,11798 \end{bmatrix} \quad (155)$$

A matriz P foi formada com as variâncias planimétricas proporcionais as coordenadas (x, y) das medições, de acordo com a Equação 156.

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{planL3(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{planL3(PD)}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{planL3(PI)}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL3(PI)}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{planL2(PD)}}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (156)$$

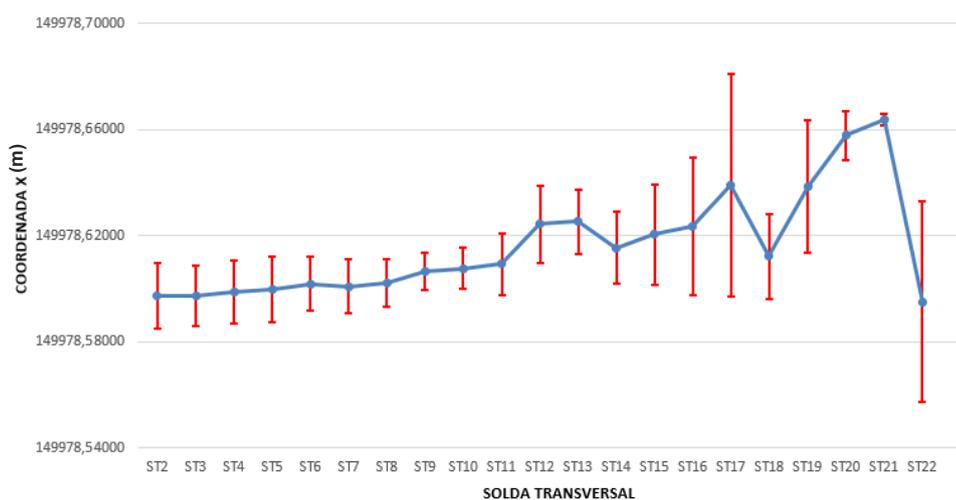
Os parâmetros (X) foram calculados através da Equação 43 e os parâmetros ajustados (X_a) com a Equação 38. Posteriormente, os cálculos dos valores observados ajustados (L_a) e resíduos (V) ocorreram, respectivamente, através das Equações 39 e 41. Após o método iterativo atingir a condição ideal, os resultados das coordenadas (x, y) passaram pelos testes estatísticos (cf. item 2.11). O resultado das coordenadas x e y do centro de cada solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e de LP1 e LP2, encontram-se no Apêndice.

Procedeu o teste global Qui-Quadrado (χ^2) com significância de 5% e os seguintes Graus de Liberdade (GL) nas seguintes soldas transversais:

- GL = 1, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,001 < \chi^2 < 5,024$ em ST16, ST17 e ST19 a ST21 (L1, L2 e L3);
- GL = 2, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,051 < \chi^2 < 7,378$ em ST10 a ST13, ST15 e ST22 (L1, L2 e L3) e ST2, ST3, ST4 e ST5 (LP1 e LP2);
- GL = 3, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,216 < \chi^2 < 9,348$ em ST1 a ST9, ST14 e ST18 (L1, L2 e L3).

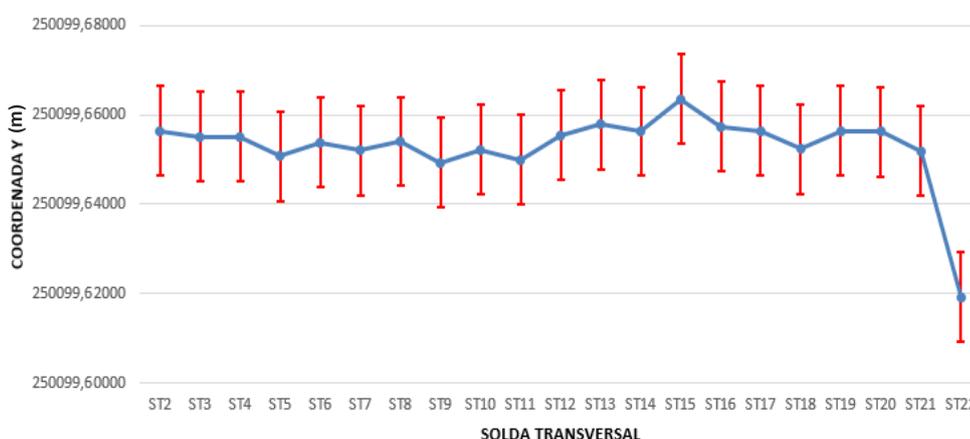
As Figuras 70 e 71 mostram os resultados de L1, L2 e L3, respectivamente, das coordenadas x e y com seus desvios padrão e desde LP1 e LP2 na Figura 72.

Figura 70 – Modelo paramétrico: Coordenadas x da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

Figura 71 – Modelo paramétrico: Coordenadas y da primeira campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



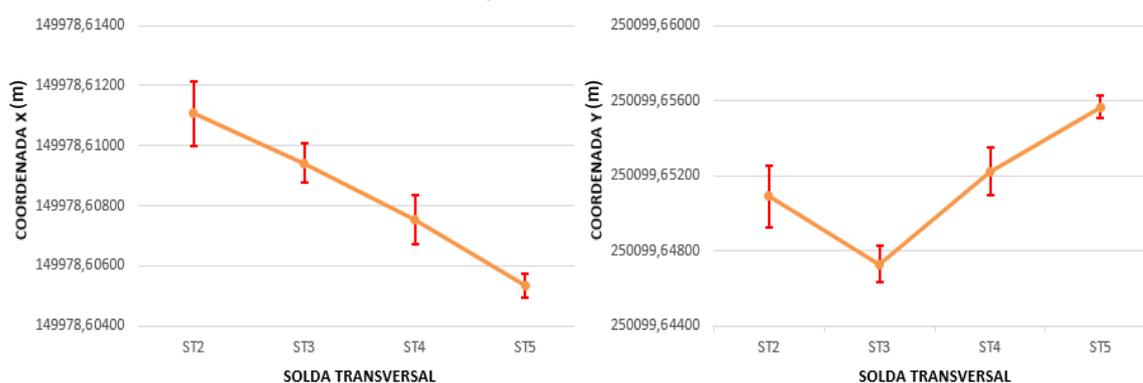
Fonte: O autor (2018).

De acordo com a Figura 70 e o Apêndice X, as coordenadas x dos centros das soldas transversais apresentam variações milimétricas de ST2 até ST11 e desvio padrão médio de $\pm 0,01043$ m. A partir da ST12 existem variações divergentes em relação a tendência apresentada até a ST11, com variações em centímetros e aumento gradual dos desvios padrão até ST17. Da solda ST18 até a ST22, as coordenadas apresentam oscilações nos resultados, considerando a tendência decrescente, e desvio padrão médio de $\pm 0,03792$ m, com maior desvio padrão de $\pm 0,00408$ m em ST22.

Na Figura 71 e Apêndice X, as coordenadas y possuem um desvio padrão médio de $\pm 0,01260$ m, com maior desvio padrão de $\pm 0,03710$ m em ST22. As coordenadas y da ST20 até ST22 apresentam uma variação decrescente com variação média de $0,01436$ m.

A Figura 72 ilustra os resultados das coordenadas x e y com seus desvios padrão sobre os pontos de referência LP1 e LP2.

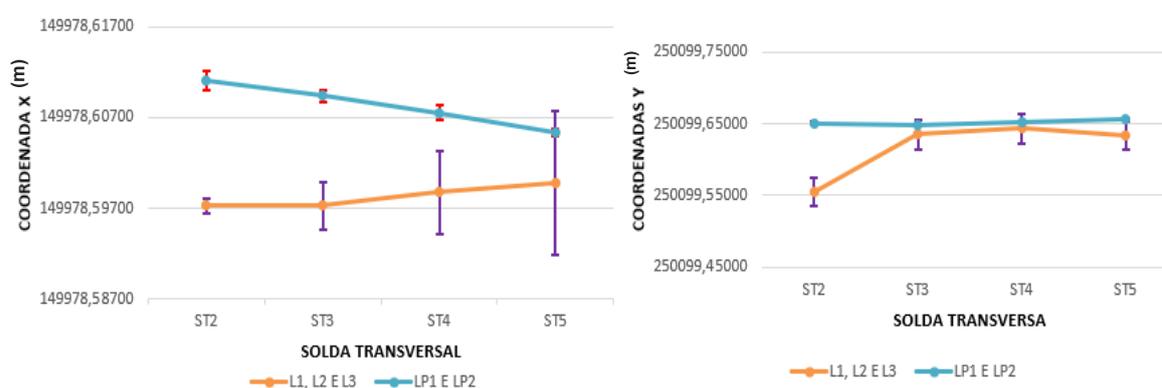
Figura 72 – Modelo paramétrico: Coordenadas x e y da primeira campanha a partir dos pontos LP1 e LP2.



Fonte: O autor (2018).

As coordenadas obtidas no hexágono regular (Figura 72) apresentam melhores resultados que os medidos sobre os pontos de referência L1, L2 e L3, sendo utilizado como referência vertical para as coordenadas obtidas no método de medição de bordas da primeira campanha. A Figura 73 exibe o comparativo das coordenadas e os resultados são apresentados nas tabelas do Apêndice.

Figura 73 – Modelo paramétrico: Comparativos das coordenadas (x , y) de ST2 a ST5 (primeira campanha).



Fonte: O autor (2018).

4.1.6 Resultados e Análises do Comportamento Dinâmico da Torre

Para a análise do desvio vertical seguiu os procedimentos descritos no item 3.11. Os cálculos dos ângulos de deflexão (Tabela 41) foram realizados a partir dos resultados das coordenadas do centro das seções circulares das soldas transversais, obtidas através do método da irradiação tridimensional e ajustadas pelo modelo combinado (cf. item 4.1.3) e das coordenadas das seções circulares das soldas transversais, obtidas pelo método de medição de bordas e ajustadas pelo modelo paramétrico (cf. item 4.1.5). As coordenadas do centro da seção circular de ST3 foi definido como referência para ambos os métodos descritos acima, devido a problemas especificados no item 4.1.3.

As coordenadas dos centros das seções circulares obtidas a partir dos pontos de referência do hexágono foram utilizadas com a origem do alinhamento vertical de referência apenas para as coordenadas oriundas da medição de bordas, visto que os resultados obtidos com o método de irradiação tridimensional a partir dos pontos de referência do hexágono foram descartados.

A distância horizontal (Tabela 40) foi calculada a partir da média das distâncias horizontais entre os pontos de referência (L1, L2 e L3) e o centro da origem do alinhamento de referência.

Tabela 40 – Distância horizontal média para os pontos de referência.

Distância horizontal (m)
101,7794

Fonte: O autor (2018).

Tabela 41 – Ângulo de deflexão para as coordenadas do centro da seção circular obtidas no método de irradiação tridimensional e de medição de bordas (primeira campanha).

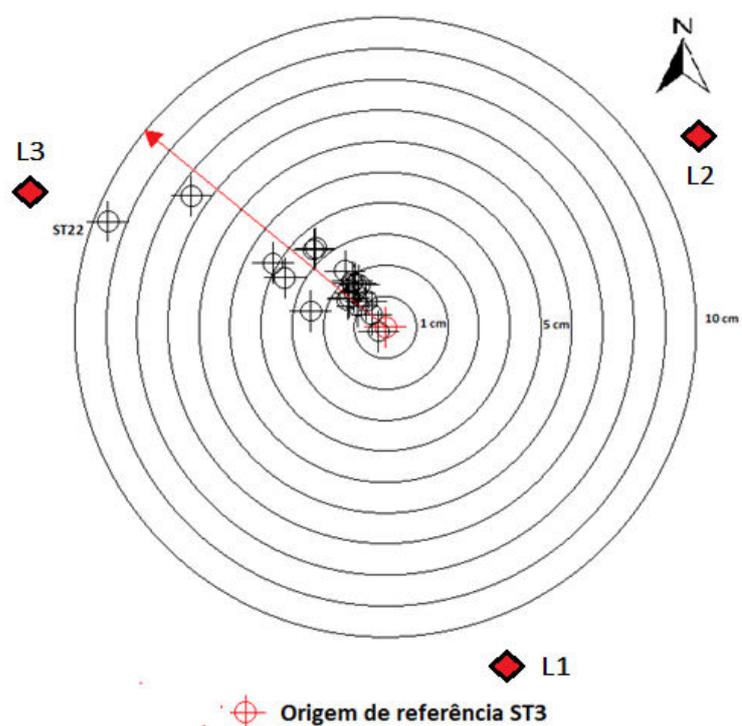
Solda Transversal	$\delta_{deflexão}$	
	Irradiação Tridimensional	Medição de Bordas
ST4	0°0'8.57"	0°0'4.01"
ST5	0°0'6.16"	0°0'6.30"
Continua		

Solda Transversal	$\delta_{deflexão}$	
	Irradiação Tridimensional	Medição de Bordas
ST6	0°0'8.57"	0°0'6.82"
ST7	0°0'19.65"	0°0'4.84"
ST8	0°0'17.91"	0°0'4.80"
ST9	0°0'14.44"	0°0'9.68"
ST10	0°0'13.07"	0°0'13.39"
ST11	0°0'19.55"	0°0'19.55"
ST12	0°0'23.99"	0°0'24.64"
ST13	0°0'17.18"	0°1'1.02"
ST14	0°0'20.59"	0°0'58.06"
ST15	0°0'19.29"	0°0'41.03"
ST16	0°0'41.64"	0°1'2.13"
ST17	0°0'57.98"	0°1'22.19"
ST18	0°0'33.60"	0°1'26.36"
ST19	0°1'6.63"	0°0'39.47"
ST20	0°0'17.08"	0°1'50.42"
ST21	0°2'2.08"	0°1'57.35"
ST22	0°2'36.39"	0°1'56.10"

Fonte: O autor (2018).

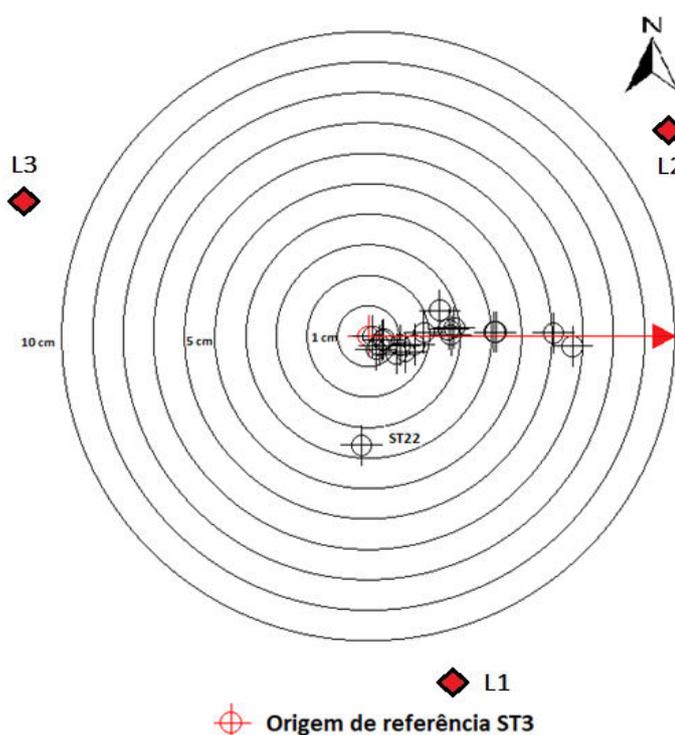
A avaliação da direção de inclinação da torre no instante das medições realizou-se a partir da distância (Equação 05) entre a origem do alinhamento do centro de ST3 e os demais centros das soldas transversais. Os resultados obtidos por meio dos dados provenientes dos métodos de irradiação tridimensional e medição de bordas encontram-se, respectivamente, ilustradas nas Figuras 74 e 75.

Figura 74 – Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de irradiação tridimensional da primeira campanha.



Fonte: O autor (2018).

Figura 75 – Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de bordas da primeira campanha.



Fonte: O autor (2018).

Os resultados dos ângulos de deflexão e a análise da direção de inclinação da torre salientam as consequências do mau tempo que dificultaram o levantamento. O comportamento do ângulo de deflexão deveria aumentar gradualmente com o aumento de cota, mas houveram pontos discrepantes desta tendência, possivelmente ocasionados pela dificuldade de visibilidade dos pontos-objeto, devido a neblina, oscilações e vibrações da torre no instante das medições.

A análise das Figuras 74 e 75 exibem o movimento da torre nos instantes que ocorreu a medição por irradiação tridimensional, na direção Noroeste, e no instante da medição de bordas, na direção Este. O acentuado movimento no curto período foi consequente as mudanças dinâmicas das direções dos ventos no momento dos levantamentos.

4.2 RESULTADOS E ANÁLISES DA SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

A segunda campanha transcorreu em conformidade com levantamentos dos pontos-objeto que ocorreram na primeira campanha, mas houveram mudanças em relação a quantidade de soldas transversais a serem medidas e a realização do caminhamento duplo no nivelamento geométrico. Os resultados e análises referentes a segunda campanha de medição seguem nos itens 4.2.1 a 4.2.6.

4.2.1 Nivelamento Geométrico de Alta Precisão

Os resultados das linhas de nivelamento e de contranivelamento dos circuitos realizados no entorno da torre Gravatá 02, entre as RN02 e RN04 e no entorno da torre Gravatá 01, encontram-se respectivamente nas Tabelas 42 a Tabela 44.

Tabela 42 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito I (segunda campanha) -Torre Gravatá 02.

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01303	8,820
L2	RN01	RN03	1	-0,00245	9,260

Continua

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L3	RN03	RN02	1	-0,01050	15,120
L8	RN02	RN03	1	0,01055	15,090
L9	RN03	RN01	1	0,00247	10,090
L10	RN01	RN02	1	-0,01314	9,740

Fonte: O autor (2018).

Tabela 43 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento do circuito II (segunda campanha) -Torre Gravatá 01.

Linha	Saída	Chegada	Nº de lances	Desnível bruto (m)	Distância (m)
L4	RN04	RN05	1	0,00269	10,970
L5	RN05	RN06	1	-0,00023	12,980
L6	RN06	RN04	1	-0,00249	9,980
L11	RN04	RN06	1	0,00248	10,060
L12	RN06	RN05	1	0,00026	12,200
L13	RN05	RN04	1	-0,00278	9,280

Fonte: O autor (2018).

Tabela 44 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis e distâncias brutos do nivelamento e contranivelamento do circuito III (segunda campanha) - Entre a Torre Gravatá 02 e Torre Gravatá 01.

Linha	Saída	Chegada	N de lances	Desnível bruto	Distância (m)
L7	RN02	RN04	17	12,66673	451,860
L14	RN04	RN02	17	-12,66730	452,340

Fonte: O autor (2018).

Os resultados referentes ao erro de fechamento, o perímetro e a tolerância realizados nos circuitos I, II e III encontram-se, respectivamente, nas Tabela 45, Tabela 46 e Tabela 47.

Tabela 45 - Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 02 (segunda campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
I	-0,00008	33,200	0,00055	0,01031	01/09/2018
I	-0,00012	34,920	0,00056	0,01520	01/09/2018

Fonte: O autor (2018).

Tabela 46 - Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados no entorno da torre Gravatá 01 (segunda campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
II	-0,00001	33,930	0,00055	0,00130	01/09/2018
II	-0,00005	31,535	0,00053	0,00565	01/09/2018

Fonte: O autor (2018).

Tabela 47 - Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisão do nivelamento realizados entre as RN02 e RN04 (segunda campanha).

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (m)	Tolerância (m)	Precisão do nivelamento (mm/Km)	Data de Leituras
III	-0,00053	493,705	0,00211	0,26333	01/09/2018

Fonte: O autor (2018).

4.2.1.1 Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico dos Circuitos

De modo igual a primeira campanha (cf. item 4.1.1.1), os desníveis e as cotas dos circuitos foram ajustados através do MMQ- modelo paramétrico (cf. item 2.10.1) e os resultados referentes ao ajustamento das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I, circuito II e circuito III estão nas Tabelas 48 a 50 e as cotas ajustadas e seus respectivos desvios padrão nas Tabelas 51 e 52.

Tabela 48 – Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I (segunda campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN01	0,01301	±0,00003
RN01	RN03	-0,00247	±0,00003
RN03	RN02	-0,01054	±0,00003
RN02	RN03	0,01056	±0,00002
RN03	RN01	0,00253	±0,00004
RN01	RN02	-0,01309	±0,00004

Fonte: O autor (2018).

Tabela 49 – Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito II (segunda campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN04	RN05	0,00269	±0,00003
RN05	RN06	-0,00023	±0,00003
RN06	RN04	-0,00246	±0,00003
RN04	RN06	0,00249	±0,00005
RN06	RN05	-0,00028	±0,00005
RN05	RN04	-0,00277	±0,00005

Fonte: O autor (2018).

Tabela 50 – Resultados do ajustamento por MMQ das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito III (segunda campanha).

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN04	12,66673	±0,00022
RN04	RN02	-12,66730	±0,00041

Fonte: O autor (2018).

Tabela 51 – Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no nivelamento (segunda campanha).

Pinos	Altitudes ajustadas (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01301	±0,00003
RN03	1000,01054	±0,00003
RN04	1012,66673	±0,00022
RN05	1012,66943	±0,00022
RN06	1012,66921	±0,00022

Fonte: O autor (2018).

Tabela 52 – Cotas ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidas no contranivelamento (segunda campanha).

Pinos	Altitudes ajustadas (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01309	±0,00004
RN03	1000,01056	±0,00002
RN04	1012,66730	±0,00041
RN05	1012,67007	±0,00041
RN06	1012,66979	±0,00041

Fonte: O autor (2018).

A Tabela 53 possui a cota média e seu respectivo desvio padrão.

Tabela 53 - Cotas médias ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão (segunda campanha).

Pinos	Cota Média (m)	Desvio padrão (m)
RN01	1000,01305	±0,00005
RN03	1000,01055	±0,00004
RN04	1012,66702	±0,00046
RN05	1012,66975	±0,00047
RN06	1012,66950	±0,00047

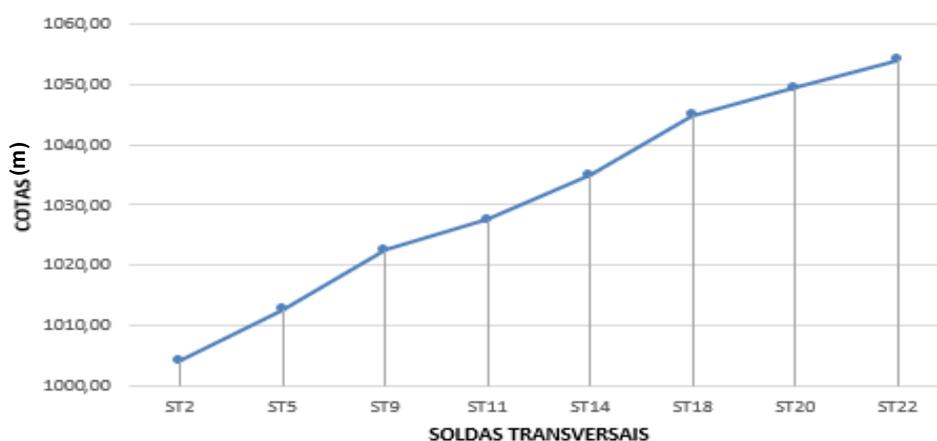
Fonte: O autor (2018).

Os resultados retratados na Tabela 53 apresentam menores desvios padrão nos pinos da torre Gravatá 02, na casa do centésimo de milímetro, e máximos nos pinos da Torres Gravatá 01, com resultado em décimos de milímetros.

4.2.2 Método da Irradiação Tridimensional Aplicada na Torre

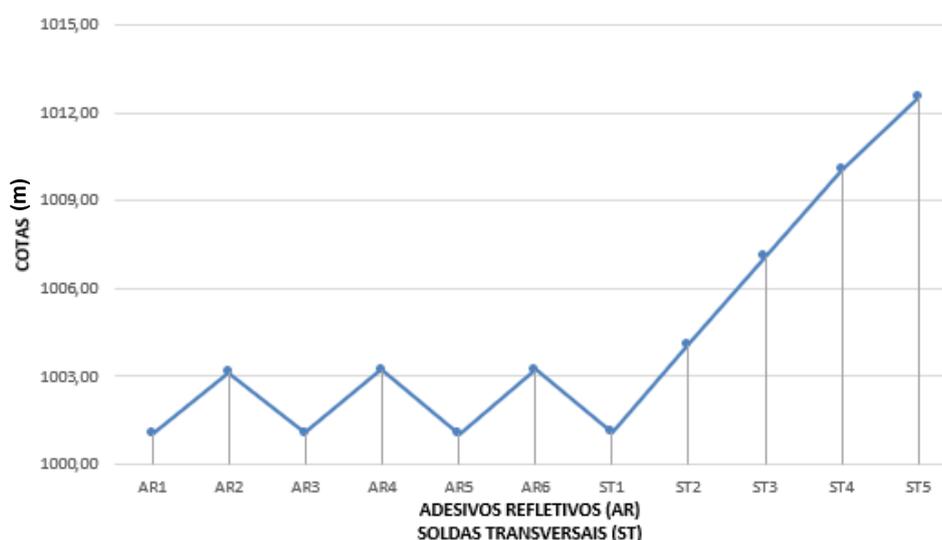
O resultado dos cálculos das cotas a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e os resultados dos cálculos das cotas das soldas transversais e adesivos refletivos (AR) obtidos a partir dos pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 encontram-se no Apêndice. As Figura 76 e 77 ilustram, respectivamente, as cotas médias de cada solda obtidas em L1, L2 e L3 e a partir de LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

Figura 76 – Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de L1, L2 e L3 (segunda campanha).



Fonte: O autor (2018).

Figura 77 – Gráfico das cotas médias das soldas transversais a partir de LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 (segunda campanha).



Fonte: O autor (2018).

A Tabela 54 consta os resultados das medidas de dispersão das soldas transversais sobre os pontos de referência L1, L2 e L3. A Tabela 55 possui os resultados sobre os pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6. Os resultados das cotas apresentam melhoras em relação a primeira campanha de medição.

Tabela 54 - Medidas de dispersão da segunda campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	Cota _{média} (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV (%)
ST2	1004,11691	1004,08942	0,02748	1004,10222	0,0004	0,0200	0,0020
ST5	1012,53721	1012,51367	0,02354	1012,52412	0,0004	0,0193	0,0019
ST9	1022,47214	1022,44103	0,03111	1022,45812	0,0005	0,0232	0,0023
ST11	1027,52250	1027,50510	0,01740	1027,51289	0,0004	0,0200	0,0019
ST14	1034,96412	1034,94356	0,02057	1034,95430	0,0003	0,0174	0,0017
ST18	1044,88409	1044,84898	0,03511	1044,86330	0,0004	0,0207	0,0020
ST20	1049,51205	1049,48675	0,02529	1049,49784	0,0004	0,0187	0,0018
ST22	1054,09582	1054,03723	0,05859	1054,06651	0,0009	0,0304	0,0029

Fonte: O autor (2018).

Tabela 55 - Medidas de dispersão da segunda campanha das cotas das soldas transversais a partir dos pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

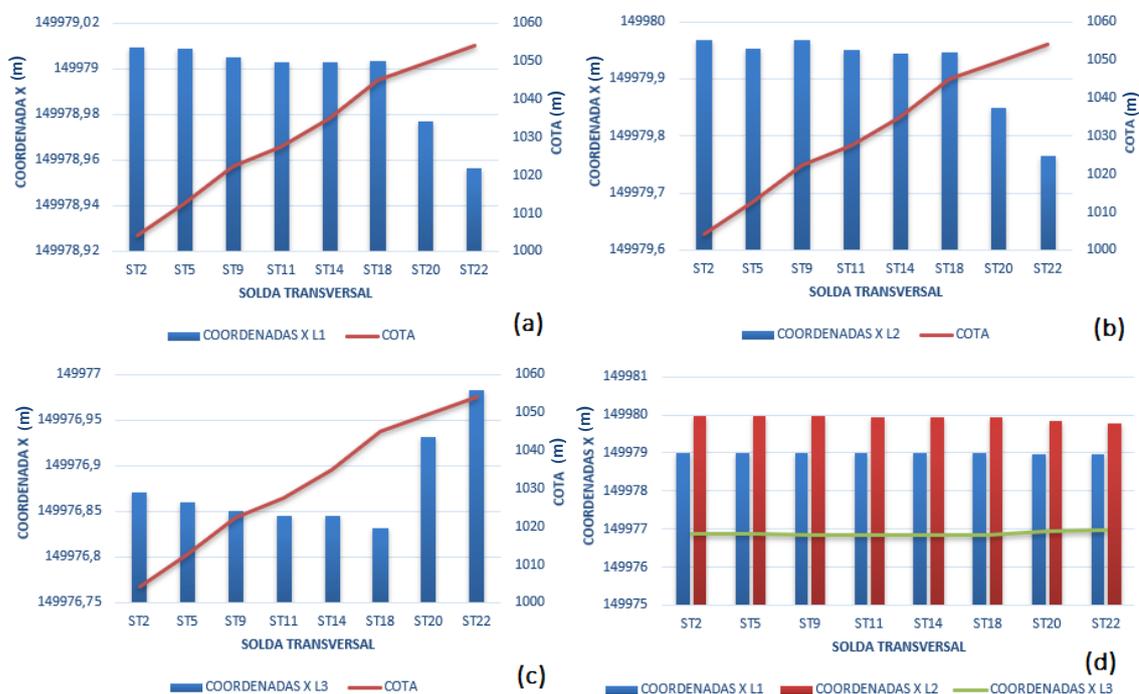
ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	Cota _{média} (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV (%)
ST1	1001,13585	1001,10009	0,03575	1001,11510	0,00017	0,01308	0,0013
ST2	1004,14886	1004,10043	0,04843	1004,11214	0,00017	0,012944	0,0013
ST3	1007,08487	1007,06462	0,02024	1007,07485	0,00005	0,006785	0,0007
ST4	1010,05295	1010,03421	0,01874	1010,04429	0,00003	0,005295	0,0005
ST5	1012,53278	1012,51133	0,02145	1012,52276	0,00003	0,005882	0,0006

Fonte: O autor (2018).

O resultado dos cálculos das coordenadas x e y das soldas transversais a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e das coordenadas x e y em LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6, assim como as respectivas medidas de dispersões estão no Apêndice. A Figura 78 ilustra os gráficos das coordenadas médias x das soldas transversais L1 (a),

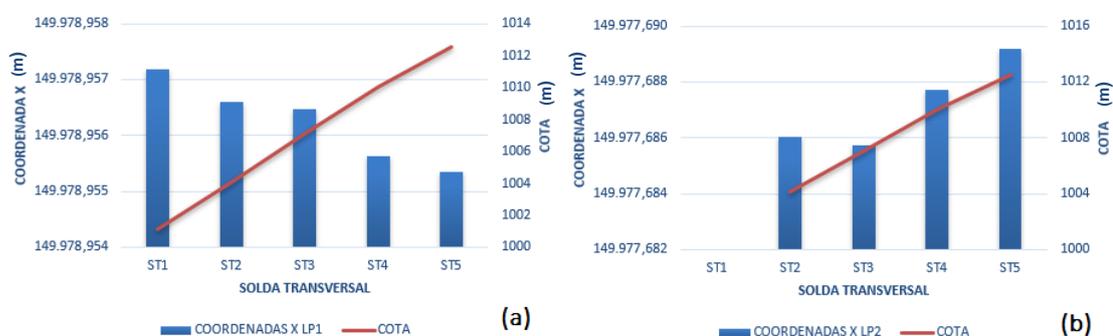
L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d) e as Figuras 79 a 81 mostram os gráficos das coordenadas LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

Figura 78 – Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d).



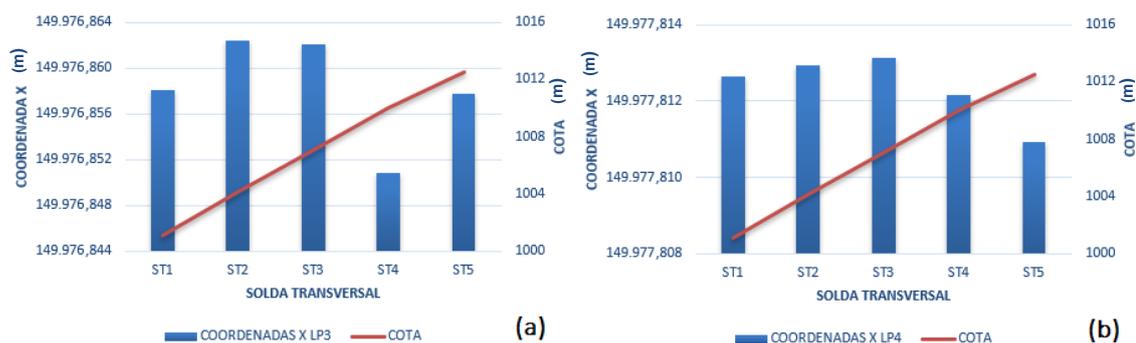
Fonte: O autor (2018).

Figura 79 – Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP1(a) e LP2(b).



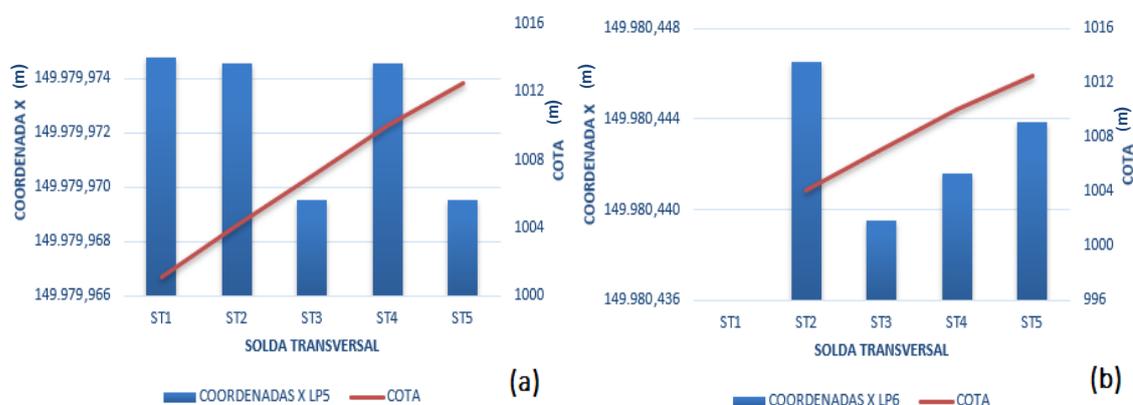
Fonte: O autor (2018).

Figura 80 – Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP3(a) e LP4(b).



Fonte: O autor (2018).

Figura 81 – Média das Coordenadas x: Método da irradiação tridimensional – (Segunda campanha): LP5(a) e LP6(b).



Fonte: O autor (2018).

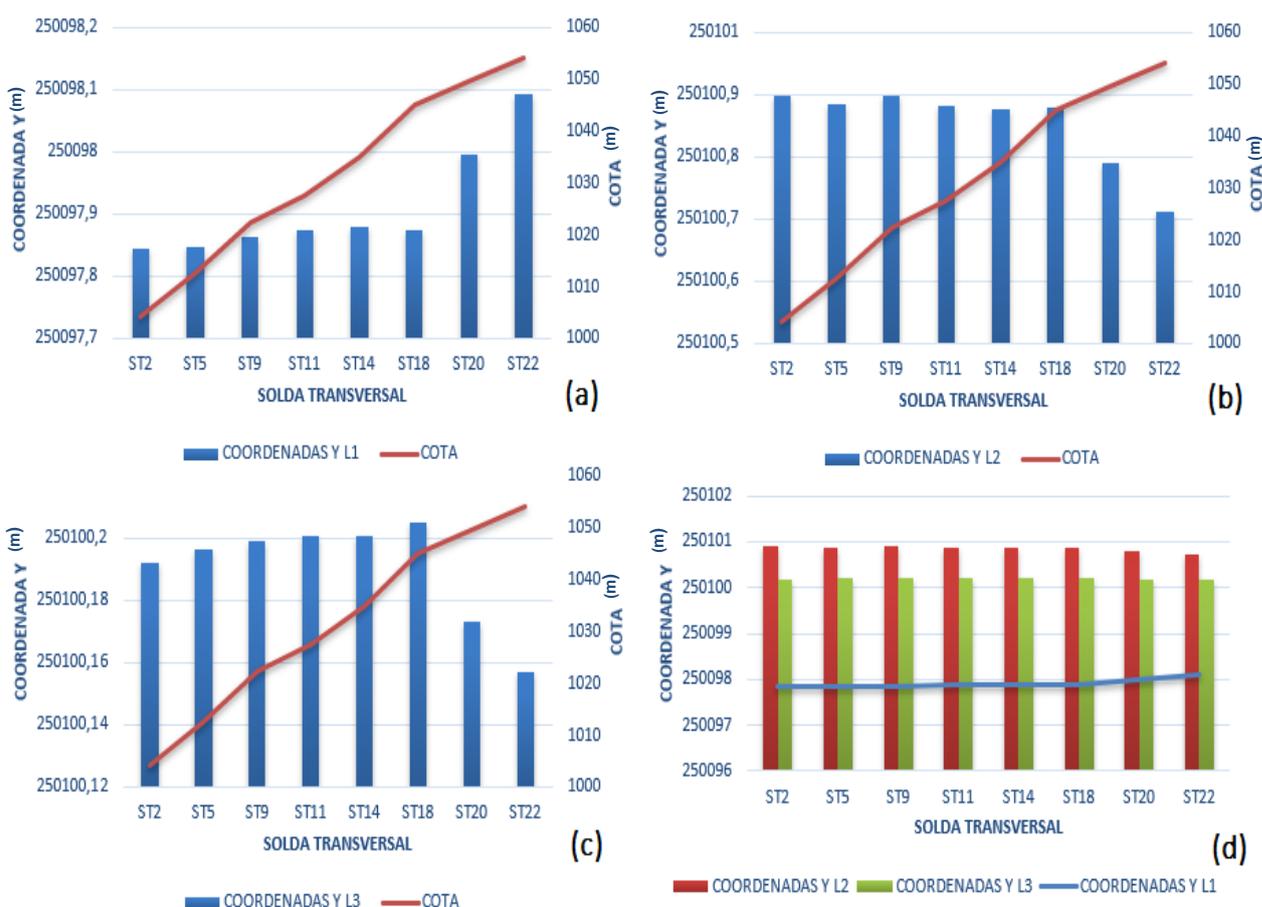
De acordo com a figura 78, os resultados das coordenadas x medidos sobre o ponto de referência L1 (Figura 78 (a)) apresentam um decréscimo milimétrico da ST2 até a ST14 e em centímetros da ST18 a ST22, da mesma maneira que os resultados obtidos sobre o ponto de referência em L2 (Figura 78 (b)). No entanto, sobre o ponto de referência L3 (Figura 78 (c)) os resultados das coordenadas x possuem um crescimento em centímetros da ST18 a ST22.

Os resultados da média das coordenadas x medidos sobre LP1 e LP2 (Figura 79) possuem valores decrescentes de ST1 a ST5 (Figura 79 (a)) e crescentes da ST2 até a ST5 sobre o ponto de referência LP2 (Figura 79 (b)). Os resultados sobre os pontos de referência LP3 e LP4 (Figura 80) possuem uma tendência média em reduzir o valor da coordenada com o aumento da cota, tendo em ST4 resultado destoante (Figura 80 (a)). Na Figura 81 são representados os resultados da coordenadas x sobre

o ponto de referência LP5 e LP6 (Figura 81), sendo evidenciado um valor constante médio entre as soldas transversais obtidos sobre LP5 (Figura 81 (a)), tendo os resultados das coordenadas x fora do padrão em ST3 e ST5 e um crescimento no valor das coordenadas x medidos sobre LP6 (Figura 81 (b)), tendo resultado fora do padrão em ST1.

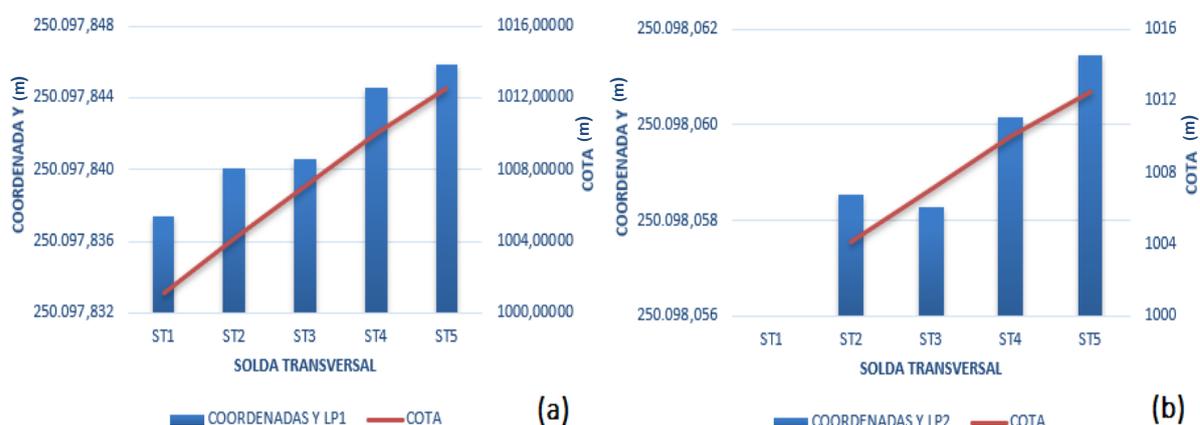
As coordenadas médias y das soldas transversais L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d) são exibidas na Figura 82 e as Figuras 83 a 85 ilustram os gráficos das coordenadas LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

Figura 82 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): L1 (a), L2 (b), L3 (c) e o agrupamento (d).



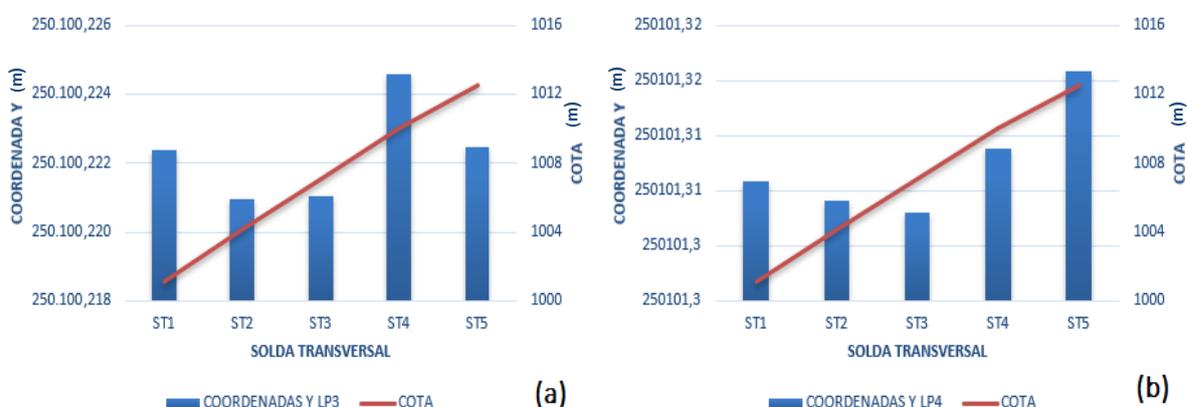
Fonte: O autor (2018).

Figura 83 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP1 (a) e LP2 (b).



Fonte: O autor (2018).

Figura 84 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP3 (a) e LP4 (b).



Fonte: O autor (2018).

Figura 85 – Média das Coordenadas y (Método da irradiação tridimensional - Segunda campanha): LP5 (a) e LP6 (b).



Fonte: O autor (2018).

As coordenadas y medidos sobre o ponto de referência L1 (Figura 82(a)) e L3 (Figura 82 (c)) possuem um crescimento em milímetros da ST2 até a ST18, mas com um decréscimo nas coordenadas da ST20 e ST22, obtidas em L3 , e crescimento nas coordenadas medidas sobre o ponto de referência L1. No ponto de referência L2 (Figura 82 (b)) os resultados das coordenadas y possuem um decréscimo.

A média das coordenadas y sobre LP1 e LP2 (Figura 83) possuem valores crescentes de ST1 a ST5 (Figura 83 (a)) e crescentes da ST2 até a ST5 sobre o ponto de referência LP2 (Figura 79 (b)), com resultado incongruente em ST3. Na Figura 84 é possível verificar as coordenadas y e medidas sobre o ponto de referência LP3 e LP4. Os resultados em LP3 mostram uma tendência média em aumentar os valores das coordenadas y com o aumento da cota, tendo ST1 e ST4 resultados desarmônicos (Figura 84 (a)). As coordenadas possuem um decréscimo de ST1 a ST3 e crescimento de ST3 a ST5 no ponto de referência LP4. Essa tendência do resultado é devido a valores discrepantes na ST1 e ST3, onde desconsiderando esses resultados há uma orientação crescente das coordenadas y com o aumento das cotas. As coordenadas y e medidas sobre o ponto de referência LP5 e LP6 (Figura 85), aponta um valor constante médio entre as soldas transversais obtidos sobre LP5 (Figura 85 (a)), tendo os resultados das coordenadas y fora do padrão em ST3 e ST5 e um crescimento no valor das coordenadas y e medidas sobre LP6 (Figura 85 (b)), tendo resultado fora do padrão em ST3 e ST5.

4.2.3 Ajustamento MMQ - Modelo Combinado das Seções Circulares da Torre

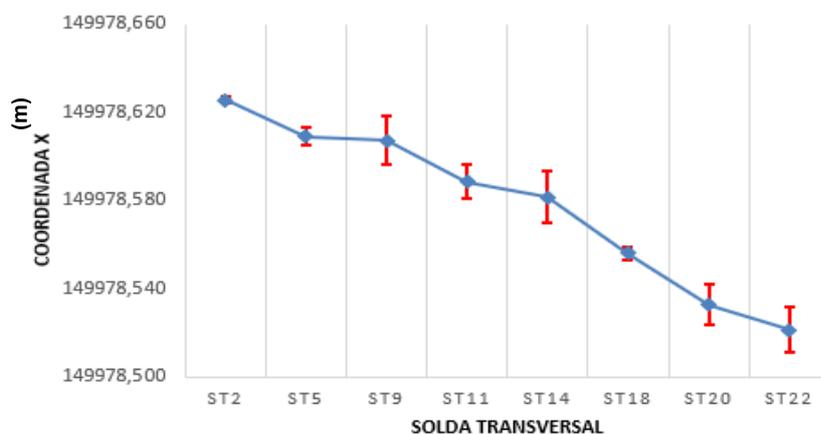
A determinação do raio e as coordenadas do centro de cada seção circular da solda transversal através do ajustamento pelo MMQ-modelo combinado seguiu os mesmos procedimentos da primeira campanha (5.1.3), ou seja, mesmos parâmetros aproximados das coordenadas do ponto central e matriz dos pesos formada pelo inverso da variância obtidos através das propagações adquiridas nas medições da segunda campanha.

Na análise de valores discrepantes e não utilizados no ajustamento foram descartados as medições dos pontos de referência LP1 e LP5. O Teste Global Qui-Quadrado (χ^2) teve os seguintes graus de liberdade (GL) nas seguintes soldas transversais:

- GL = 1, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,001 < \chi^2 < 5,024$ em ST18, ST20 e ST22 (L1, L2 e L3) e em ST1 (LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6);
- GL = 2, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,051 < \chi^2 < 7,378$ em ST2, ST5, ST9, ST11 e ST14 (L1, L2 e L3);
- GL = 5, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,831 < \chi^2 < 12,833$ em ST2 a ST5 (LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6).

O resultado das coordenadas do centro das soldas transversais (x, y) e seus respectivos raios, obtidos através do MMQ-modelo combinado a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 e dos pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 estão no Apêndice. As Figuras 86 e 87 mostram, respectivamente, os resultados das coordenadas x e y a partir de L1, L2 e L3. A Figura 88 expressa as coordenadas (x, y) obtidas a partir de LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

Figura 86 – Modelo combinado: Coordenadas x da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



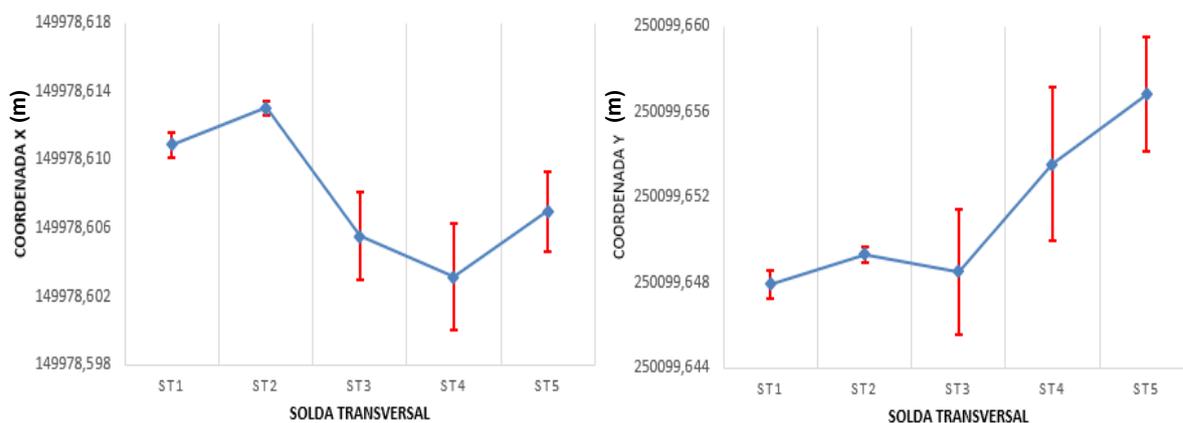
Fonte: O autor (2018).

Figura 87 – Modelo combinado: Coordenadas y da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

Figura 88 – Modelo combinado: Coordenadas x e y da segunda campanha a partir dos pontos LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.



Fonte: O autor (2018).

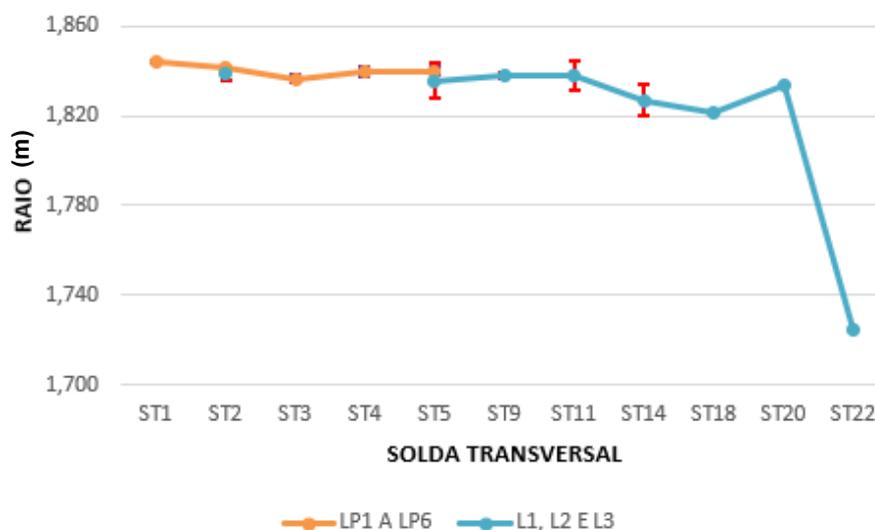
De acordo com a Figura 86 e o Apêndice BD, as coordenadas x apresentam redução com o aumento da cota, tendo com maior valor de $149978,62545 \pm 0,00146$ m da ST2 e o menor valor de $149978,52136 \pm 0,01032$ m para a ST22. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST9 e ST20 com $\pm 0,01092$ m e $\pm 0,00930$ m, respectivamente.

Na Figura 87 e o Apêndice BD, as coordenadas y possuem um crescimento com o aumento da cota, tendo com maior valor de $250099,64242 \pm 0,00142$ m da ST2 e o menor valor de $250099,66409 \pm 0,00896$ m para a ST22, com resultados discrepantes da tendência em ST9 e ST11. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST14 e ST18 com $\pm 0,01167$ m e $\pm 0,00224$ m, respectivamente.

Conforme a Figura 88 e o Apêndice BE, são apresentadas as médias das coordenadas (x, y) medidas sobre os pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6. As coordenadas x apresentam uma variação decrescente, com discrepâncias da tendência nas ST2 e ST5. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST3 com $\pm 0,00256$ m e $\pm 0,00314$ m na ST4. No entanto, as coordenadas y possuem uma variação crescente, com resultado discrepante na ST3 e desvio padrão de $\pm 0,00293$ m. As coordenadas obtidas no hexágono regular são concomitantes com as coordenadas a partir dos pontos de referência do triângulo regular, sendo definidos como referência vertical.

Os raios dos centros das seções circulares e os desvios padrão obtidos a partir dos pontos de referência do hexágono e do triângulo encontram-se na Figura 89.

Figura 89 – Raios das seções circulares da segunda campanha a partir dos pontos de referência do hexágono e do triângulo.



Fonte: O autor (2018).

De acordo com a Figura 89, A tendência geral dos raios das soldas transversais são coerentes e coincidentes entre os resultados obtidos entre os pontos de referência do hexágono regular e triângulo equilátero. Conforme o Apêndice BD e BE, o raio com maior valor é de $1,8473 \pm 0,00049$ m da ST1 e o menor valor de $1,72453 \pm 0,00687$ m para a ST22.

4.2.4 Método de Medição de Bordas Aplicada na Torre

As coordenadas do centro de cada solda transversal a partir das leituras na borda esquerda e borda direita foram determinadas conforme os processos realizados no item 4.1.4. O resultado do centro de cada solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2, L3, LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 encontram-se no Apêndice.

O resultado do azimute do centro de cada solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 encontra-se na Tabela 56, a partir dos pontos de referência LP1 a LP3 na Tabela 57 e a partir dos pontos de referência LP4 a LP6 na Tabela 58.

Tabela 56 – Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 (segunda campanha).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST2	347°53'51.01"	347°53'51.51"	227°41'14.59"	227°41'9.59"	107°51'5.49"	107°51'7.49"
ST5	347°53'46.51"	347°53'46.51"	227°41'15.10"	227°41'10.60"	107°51'9.99"	107°51'8.49"
ST9	347°53'29.01"	347°53'37.01"	227°41'33.10"	227°41'38.10"	107°51'5.49"	107°51'10.49"
ST11	347°53'53.01"	347°53'56.51"	227°41'42.10"	227°41'38.60"	107°51'8.49"	107°51'9.99"
ST14	347°53'3.01"	347°53'22.52"	227°42'20.10"	227°42'7.59"	107°51'7.49"	107°51'4.99"
ST18	347°53'51.51"	347°53'10.51"	227°42'27.60"	227°42'35.60"	107°51'30.99"	107°51'9.49"
ST20	347°53'3.51"	347°53'13.52"	227°43'17.60"	227°43'16.60"	107°51'42.49"	107°51'20.99"
ST22	347°53'13.52"	347°53'19.51"	227°42'41.10"	227°43'25.10"	107°51'28.99"	107°51'1.49"

Fonte: O autor (2018).

Tabela 57 – Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP1, LP2 e LP3 (segunda campanha).

ST	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)	LP3(PD)	LP3(PI)
ST1	347°52'18.77"	347°52'34.77"	—	—	107°50'9.79"	107°50'11.28"
ST2	347°52'29.28"	347°52'34.28"	47°57'21.57"	47°57'27.07"	107°50'2.28"	107°49'59.28"
ST3	347°52'18.77"	347°52'25.28"	47°57'21.57"	47°57'25.07"	107°49'58.28"	107°49'52.29"
ST4	347°52'19.27"	347°52'27.77"	47°57'3.07"	47°57'10.56"	107°49'55.79"	107°49'54.28"
ST5	347°52'13.27"	347°52'24.27"	47°57'39.06"	47°57'48.56"	107°50'7.78"	107°49'54.28"

Fonte: O autor (2018).

Tabela 58 – Azimutes referentes a direção horizontal do centro da solda transversal a partir dos pontos de referência LP4, LP5 e LP6 (segunda campanha).

ST	LP4(PD)	LP4(PI)	LP5(PD)	LP5(PI)	LP6(PD)	LP6(PI)
ST1	167°48'52.28"	167°48'54.28"	227°40'2.78"	227°40'2.78"	—	—
ST2	167°48'52.78"	167°48'54.28"	227°40'2.28"	227°40'4.28"	287°48'7.67"	287°48'3.67"
ST3	167°48'51.78"	167°48'2.27"	227°40'2.28"	227°40'4.78"	287°48'15.17"	287°48'0.67"
ST4	167°48'51.78"	167°48'52.78"	227°40'23.28"	227°40'30.78"	287°48'15.17"	287°48'9.67"
ST5	167°48'51.78"	167°48'52.28"	227°40'1.78"	227°40'4.78"	287°48'6.17"	287°48'11.67"

Fonte: O autor (2018).

4.2.5 Ajustamento MMQ- Modelo Paramétrico das Seções Circulares da Torre

De acordo com a metodologia descrita no ajustamento paramétrico da primeira campanha (5.1.5), as coordenadas do centro da seção circular de cada solda transversal foram calculadas a partir dos pontos de referência L1, L2 e L3 em ST02, ST05, ST09, ST11, ST14, ST18, ST20 e ST22 e a partir dos pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6 nas soldas ST01 a ST05, com as tabelas dos resultados no Apêndice.

Os seguintes graus de liberdade (GL) foram usados no teste Qui-Quadrado (χ^2):

- GL = 2, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,051 < \chi^2 < 7,378$ em ST1, ST10 a ST13, ST15 e ST22;
- GL = 4, com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,484 < \chi^2 < 11,143$ para as demais soldas transversais.

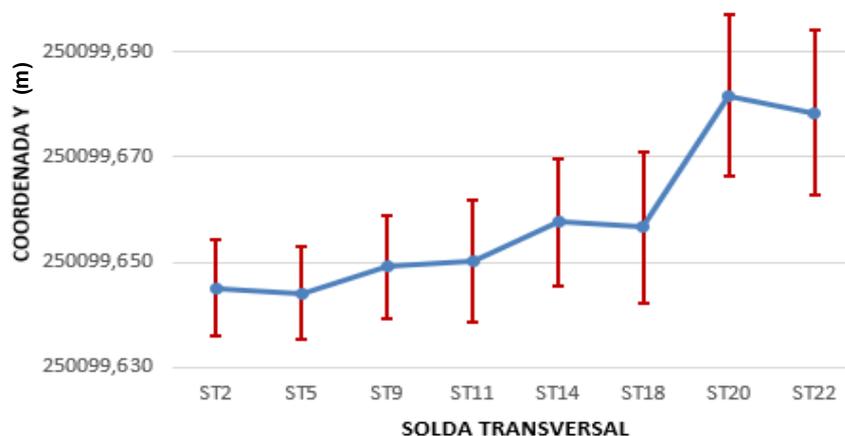
As Figuras 90 e 91 mostram, respectivamente, os resultados das coordenadas x e y a partir de L1, L2 e L3.

Figura 90 – Modelo paramétrico: Coordenadas x da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

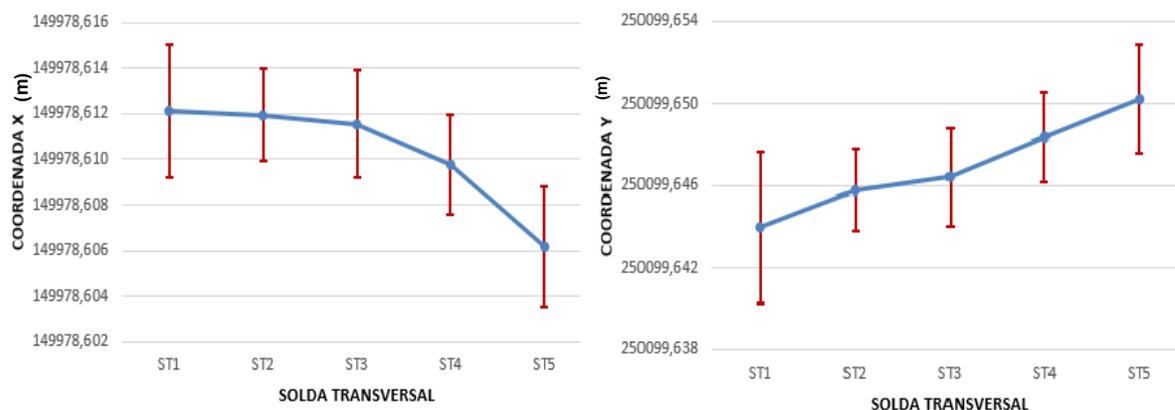
Figura 91 – Modelo paramétrico: Coordenadas y da segunda campanha a partir dos pontos L1, L2 e L3.



Fonte: O autor (2018).

A Figura 92 expressa as coordenadas (x, y) obtidas a partir de LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.

Figura 92 – Modelo paramétrico: Coordenadas (x, y) da segunda campanha a partir dos pontos LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6.



Fonte: O autor (2018).

De acordo com a Figura 90 e o Apêndice BD, as coordenadas x apresentam redução com o aumento da cota, tendo com o maior valor de $149978,62040 \pm 0,00906$ m da ST2 e o menor valor de $149978,58747 \pm 0,01564$ m para a ST22. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST20 e ST22 com $\pm 0,01535$ m e $\pm 0,01564$ m, respectivamente.

As coordenadas y, conforme a Figura 91 e o Apêndice BD é diretamente proporcional com o aumento da cota, com resultados discrepantes nas soldas

transversais ST18 e ST22, onde o maior valor é $250099,64513 \pm 0,00908$ m da ST2 e o menor valor de $250099,67834 \pm 0,01567$ m para a ST22. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST20 com $\pm 0,01538$ e $\pm 0,01567$ m de ST22 m.

Conforme a Figura 92 e o Apêndice BE, são apresentadas as médias das coordenadas (x, y) medidas sobre os pontos de referência LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6. As coordenadas x apresentam uma variação decrescente. Os maiores desvios padrão apresentados são da ST1 com $\pm 0,00293$ m e $\pm 0,00314$ m na ST5. As coordenadas y possuem uma variação crescente, onde os maiores desvios padrão são da ST1 com $\pm 0,00369$ m e $\pm 0,00265$ m na ST5.

As coordenadas obtidas no hexágono regular são concomitantes com as coordenadas a partir dos pontos de referência do triângulo regular, sendo definidos como referência vertical.

4.2.6 Resultados e Análises do Comportamento Dinâmico da Torre

O cálculo dos ângulos de deflexão e a avaliação da direção de inclinação da torre tiveram como a origem do alinhamento vertical de referência o centro de ST1 para ambos os métodos, a partir do centro da solda transversal obtido dos pontos de referência do hexágono (LP1 a LP6). Ou seja, as coordenadas do centro das soldas transversais (ST1 a ST5) obtidas através do método de irradiação tridimensional a partir dos pontos de referência do hexágono, serão referência para todas as coordenadas obtidas pelo método. O mesmo procedimento para o método de medição de bordas. O resultado dos ângulos de deflexões estão na Tabela 59 e o resultado das avaliações da direção de inclinação da torre estão ilustrados nas Figuras 93 e 94.

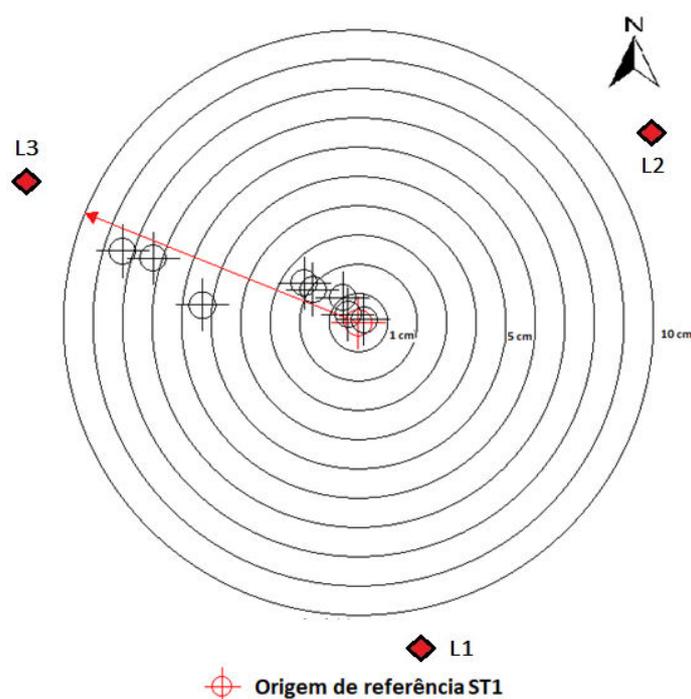
Tabela 59 – Ângulo de deflexão em relação a origem do alinhamento de referência do centro de ST1 para os resultados obtidos no método de irradiação tridimensional e o método de bordas.

Solda Transversal	Ângulo de Deflexão ($\delta_{deflexão}$)	
	L1, L2 e L3	
	Irradiação Tridimensional	Medição de Bordas
ST2	0°0'3.56"	0°0'2.18"
Continua		

Solda Transversal	Ângulo de Deflexão ($\delta_{deflexão}$)	
	L1, L2 e L3	
	Irradiação Tridimensional	Medição de Bordas
ST3	0°0'4.70"	0°0'2.28"
ST4	0°0'7.21"	0°0'6.26"
ST5	0°0'14.16"	0°0'12.66"
ST9	0°0'31.07"	0°0'31.91"
ST11	0°0'31.51"	0°0'33.77"
ST14	0°0'37.23"	0°1'6.03"
ST18	0°1'47.29"	0°1'29.37"
ST20	0°2'20.90"	0°1'38.18"
ST22	0°2'42.05"	0°1'27.60"

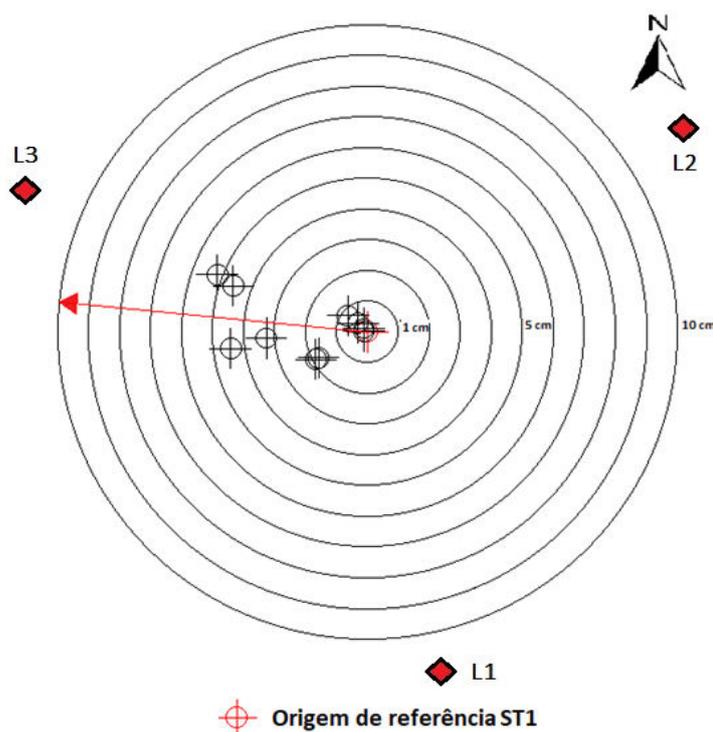
Fonte: O autor (2018).

Figura 93 – Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de irradiação tridimensional da segunda campanha.



Fonte: O autor (2018).

Figura 94 – Direção do movimento da torre através dos resultados do método de medição de bordas da segunda campanha.



Fonte: O autor (2018).

Conforme os resultados da Tabela 59, o comportamento do ângulo de deflexão em aumentar gradualmente com o aumento de cota manteve-se nas soldas transversais, sendo discrepante o resultado da ST22 por meio da medição de bordas. Os ângulos de deflexão da solda transversal mais alta medida (ST22) a partir do alinhamento vertical de referência ST1, obtidos através dos métodos de irradiação tridimensional e medição de bordas foram, respectivamente, $0^{\circ}2'42.05''$ e $0^{\circ}1'27.60''$.

A análise das Figuras 93 e 94 ilustram a direção da torre nos instantes que ocorreram as medições por irradiação tridimensional e da medição de bordas, onde ambas encontram-se na direção Noroeste.

4.3 ANÁLISE GERAL DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÕES NA TORRE

A fim de realizar a análise de possíveis recalques da fundação das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02 e avaliar a verticalidade e a geometria da torre Gravatá 02 foram utilizados os resultados da primeira e segunda campanha de medições. A seguir são abordadas essas análises.

4.3.1 Análise do Monitoramento no Plano Vertical

A princípio, todos os resultados obtidos no nivelamento e contranivelamento foram utilizados para o cálculo das médias das cotas ajustadas por MMQ – modelo paramétrico nas duas campanhas de medição, conforme os itens 4.1.1.1 e 4.2.1.1. Na Tabela 60 são apresentados os resultados das cotas em cada pino nas duas campanhas e respectivos desvios padrão e diferenças (Δ_{RN}). Os resultados indicam a menor diferença entre as duas campanhas na RN03, na casa do milésimo de milímetro, e máximos na RN06 com resultado em milímetros.

Tabela 60 – Diferenças de cotas obtidas nas duas campanhas de medição.

Pinos	Primeira campanha (m)	Desvio padrão (m)	Segunda campanha (m)	Desvio padrão (m)	Δ_{RN} (m)
RN01	1000,013056	$\pm 0,00004$	1000,013047	$\pm 0,00005$	0,00001
RN03	1000,010551	$\pm 0,00004$	1000,010547	$\pm 0,00004$	0,00001
RN04	1012,668099	$\pm 0,00031$	1012,667015	$\pm 0,00046$	0,00108
RN05	1012,670799	$\pm 0,00032$	1012,669749	$\pm 0,00047$	0,00105
RN06	1012,670570	$\pm 0,00032$	1012,669502	$\pm 0,00047$	0,00107

Fonte: O autor (2018).

Entretanto, devido aos problemas descritos no item 3.10.1 e o resultado do nivelamento e contranivelamento entre as RN02 e RN04 da primeira campanha apresentar um erro de fechamento acima de 1 mm (cf. item 4.1.1), foi desconsiderado o resultado da linha de contranivelamento da RN04 até a RN02 da primeira campanha e foram realizados novos cálculos das médias das cotas ajustadas por MMQ – modelo paramétrico da primeira campanha, considerando para o trecho RN04 até a RN02 apenas os dados do nivelamento. Os resultados das cotas em cada pino nas duas campanhas e respectivos desvios padrão e diferenças (Δ_{RN}) estão na Tabela 61. Os resultados retratam valores máximos em décimos de milímetros, discrepantes dos valores obtidos com a inclusão do contranivelamento entre as RN02 e RN04 da primeira campanha.

Tabela 61 – Diferenças de cotas obtidas nas duas campanhas de medição desconsiderando o contranivelamento da primeira campanha.

Pinos	Primeira campanha (m)	Desvio padrão (m)	Segunda campanha (m)	Desvio padrão (m)	Δ_{RN} (m)
RN01	1000,013056	$\pm 0,00004$	1000,013047	$\pm 0,00005$	0,00001
RN03	1000,010551	$\pm 0,00004$	1000,010547	$\pm 0,00004$	0,00001
RN04	1012,667655	$\pm 0,00023$	1012,667015	$\pm 0,00046$	0,00064
RN05	1012,670377	$\pm 0,00025$	1012,669749	$\pm 0,00047$	0,00063
RN06	1012,670377	$\pm 0,00025$	1012,669502	$\pm 0,00047$	0,00086

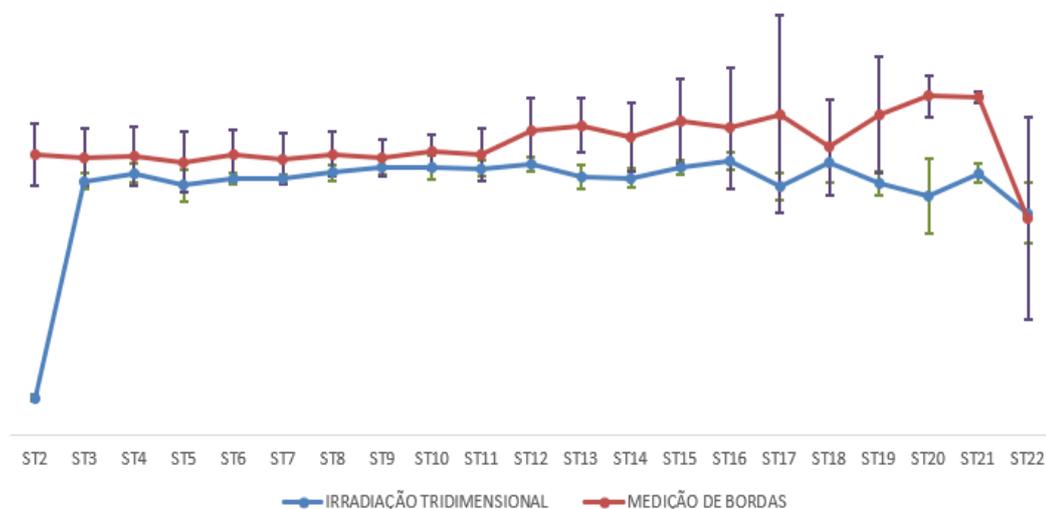
Fonte: O autor (2018).

De acordo com os dados coletados durante as duas campanhas medições, por meio do nivelamento geométrico de alta precisão, os resultados apresentados na Tabela 61 referentes a comparação temporal das cotas dos pinos implantados nas respectivas torres retratam a maior diferença entre as cotas da torre Gravatá 02 na RN01 com 0,00001 m e desvio padrão médio de $\pm 0,00006$ m e na torre Gravatá 01 na RN06 com 0,00086 m $\pm 0,00053$ m. Contudo, mesmo que os resultados das diferenças das cotas entre as duas campanhas sejam nos centésimos de milímetros na Torre Gravatá 02 e nos décimos de milímetros na Torre Gravatá 01, podendo a chegar no milímetro caso considere o máximo desvio padrão, não se pode considerar a não existência de recalques, uma vez que duas medições são poucas, no qual recomenda-se a realização de mais campanhas.

4.3.2 Análise do Monitoramento no Plano Horizontal

A Figura 95 apresenta o comparativo dos resultados da primeira campanha das coordenadas centrais e respectivos desvios padrão das seções circulares pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas. Os resultados gerais foram melhores com o método de irradiação tridimensional, mas é imprescindível lembrar que fatores referentes ao tempo interferiram de forma crucial nos levantamentos, tanto para o método de irradiação tridimensional quanto para o método de medição de bordas. Contudo, o método de medição de bordas pode ter sofrido maiores imprecisões devido as vibrações da torre, que dificultaram a visada nas bordas, principalmente nas soldas mais altas.

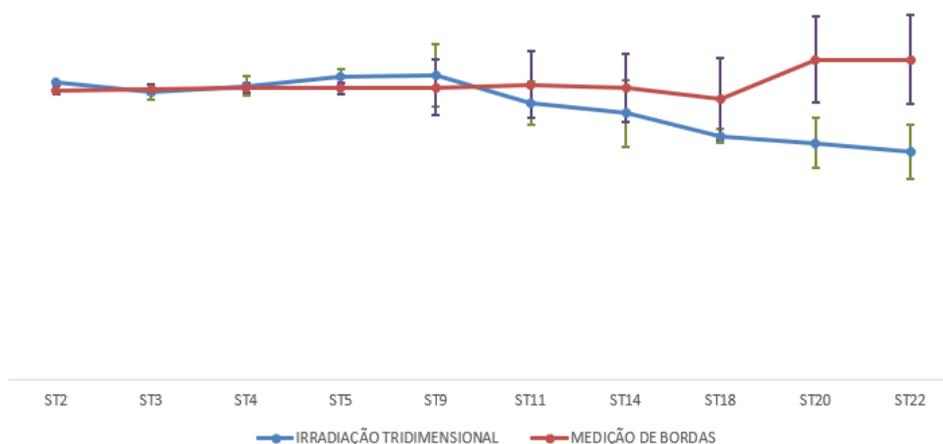
Figura 95 – Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (primeira campanha).



Fonte: O autor (2018).

Os resultados das coordenadas (x, y) e respectivos desvios padrão das seções circulares da segunda campanha de medição, obtidos através dos métodos de irradiação tridimensional e de medição de bordas, apresentam menor diferencial, sendo mais discrepantes nas soldas transversais mais altas devido aos maiores movimentos mais próximos do topo da torre. O resultado do comparativo encontra-se na Figura 96.

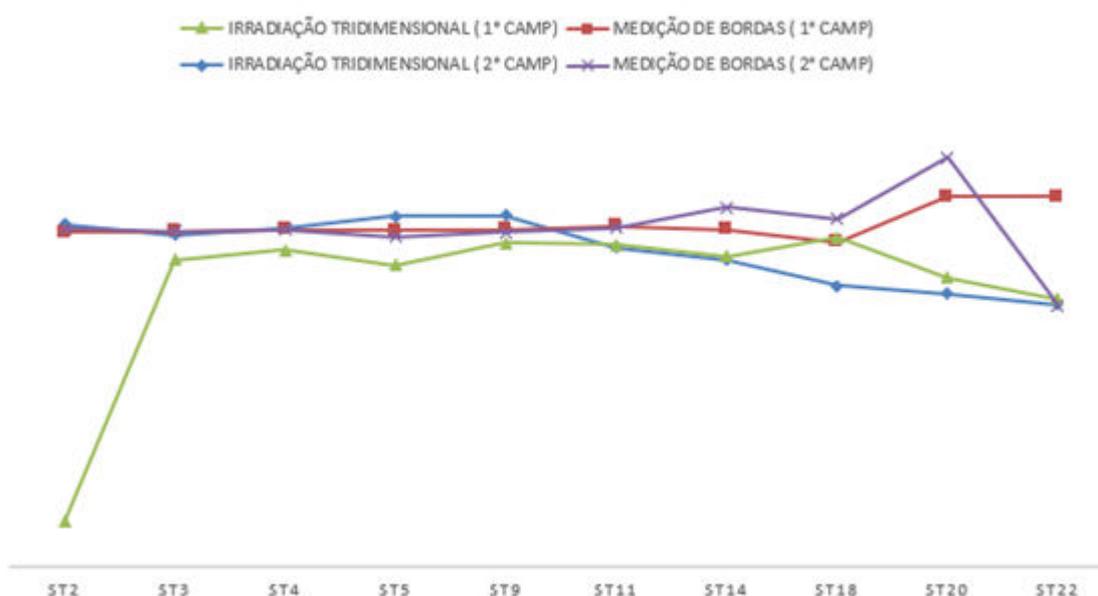
Figura 96 – Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (segunda campanha).



Fonte: O autor (2018).

A Figura 97 exibe todos os resultados das coordenadas centrais das seções circulares obtidas nas duas campanhas de medição. Os resultados gerais são conformes na extensão da torre, sendo possível avaliar a partir do alinhamento vertical de referência o movimento das seções superiores no momento das medições.

Figura 97 – Coordenadas do centro das seções circulares obtidas pelo método de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas (primeira e segunda campanha).



Fonte: O autor (2018).

Para determinar os raios das soldas transversais, foram utilizados a média dos resultados da primeira e segunda campanha de medição e os desvios padrão resultantes da propagação das campanhas e das médias, sendo desconsiderado nos cálculos os resultados dos raios discrepantes. Para a solda transversal ST01, apenas o valor da segunda campanha de medição foi considerado. Assim sendo, seu resultado é igual a $1,8431 \pm 0,0005$ m. A Tabela 62 apresenta os resultados da média dos raios para cada solda transversal e o respectivo resultado do desvio padrão resultante.

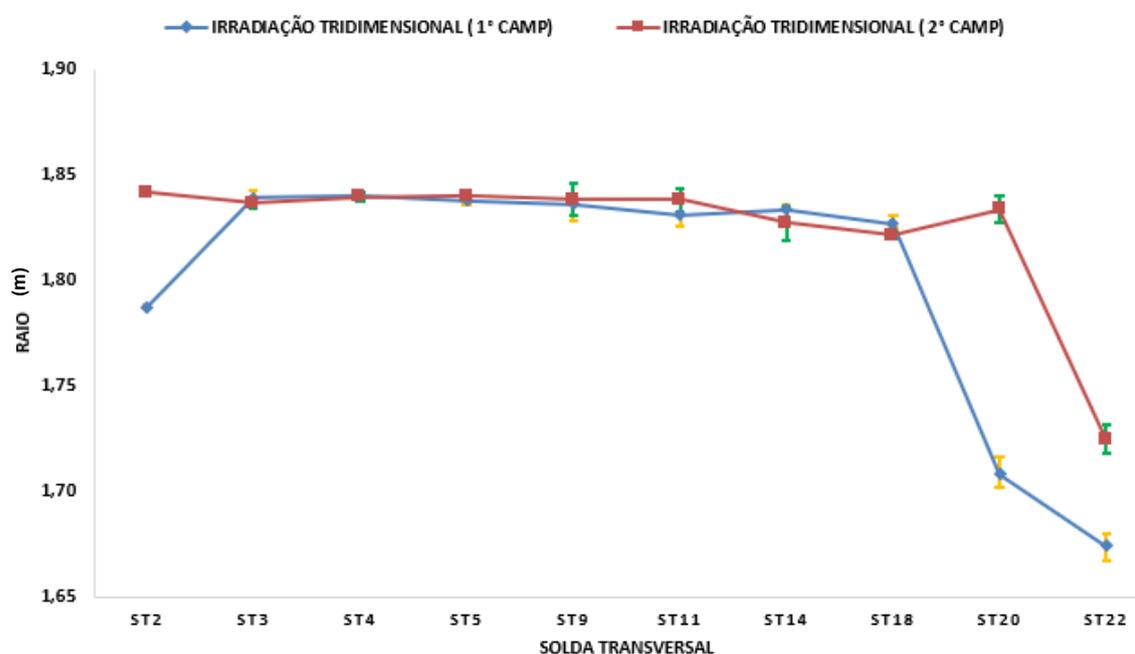
Tabela 62 – Raio médio e respectivos desvios padrão das soldas transversais.

Soldas Transversais	Raio Médio (m)	Desvio padrão (m)
ST2	1,8414	0,0062
ST3	1,8397	0,0048
ST4	1,8465	0,0111
ST5	1,8413	0,0099
ST9	1,8369	0,0078
ST11	1,8344	0,0066
ST14	1,8303	0,0090
ST18	1,8239	0,0049
ST20	1,7709	0,0633
ST22	1,6994	0,0268

Fonte: O autor (2018).

A Figura 98 ilustra o comparativo dos raios das seções circulares das duas campanhas de medição, obtidos através das medições pelo método de irradiação tridimensional e ajustamento MMQ modelo combinado.

Figura 98 – Raios das seções circulares obtidos pelo método de irradiação tridimensional (primeira e segunda campanha).



Fonte: O autor (2018).

Na análise da Tabela 61 e Figura 98, os raios com seus respectivos desvios padrão são coerentes e análogos na maioria das soldas transversais, exibindo a tendência dos raios das soldas transversais em serem iguais ou menores com o aumento da altura da torre. As soldas transversais ST20 e ST22 exibem desigualdades entre os resultados, sendo mais garantida os resultados da segunda campanha devido aos problemas que ocorreram durante as medições da primeira medição.

Para uma maior aproximação da deflexão da torre entre o alinhamento de referência e o centro geométrico de ST22, foi realizado o cálculo da média das deflexões dos resultados obtidos através do método de irradiação tridimensional da primeira campanha e segunda campanha, tendo como resultado o ângulo médio de $0^{\circ}2'39.22'' \pm 2.83''$. As medições de bordas na parte mais alta foram prejudicadas por causa das oscilações e vibrações da torre, por isso foram desconsideradas do cálculo da média.

Conforme o item 3.1.1, a torre eólica monitorada possui 70 metros de altura. Entretanto, houve a impossibilidade da realização de medições do topo da torre sobre todos os pontos de referência a partir do triângulo equilátero. Para definir o deslocamento linear e o ângulo de deflexão do topo, houve a necessidade de determinar uma relação matemática $y=f(x)$ através do ajuste de uma curva aos pontos medidos do centro geométrico das soldas transversais inferiores.

Em consequência de os pontos serem obtidos através de medições, existe erros nos dados, sendo improvável encontrar uma curva da forma desejada que passe por todos os pontos. Por isto, houve a necessidade de determinar os coeficientes da função que melhor ajustasse os dados. O Método Dos Mínimos Quadrados foi utilizado para ajustar a curva com base no padrão apresentado pelos pontos. Informações referentes ao método e as modelagens matemáticas para determinar os coeficientes da função e o coeficiente de determinação (R^2) são descritos em Ruggiero e Lopes (1997).

Os resultados do método da irradiação tridimensional das medições da segunda campanha foram utilizados por ter resultados com maior precisão e qualidade. A função utilizada foi o deslocamento linear em relação a sua cota. O resultado com base no padrão apresentado é uma função polinomial de 2º grau. A Equação 157 representa a função ajustada, apresentada na Figura 99.

$$\Delta = 5 \cdot 10^{-5} c^2 - 0,1011 c + 51,191 \quad (157)$$

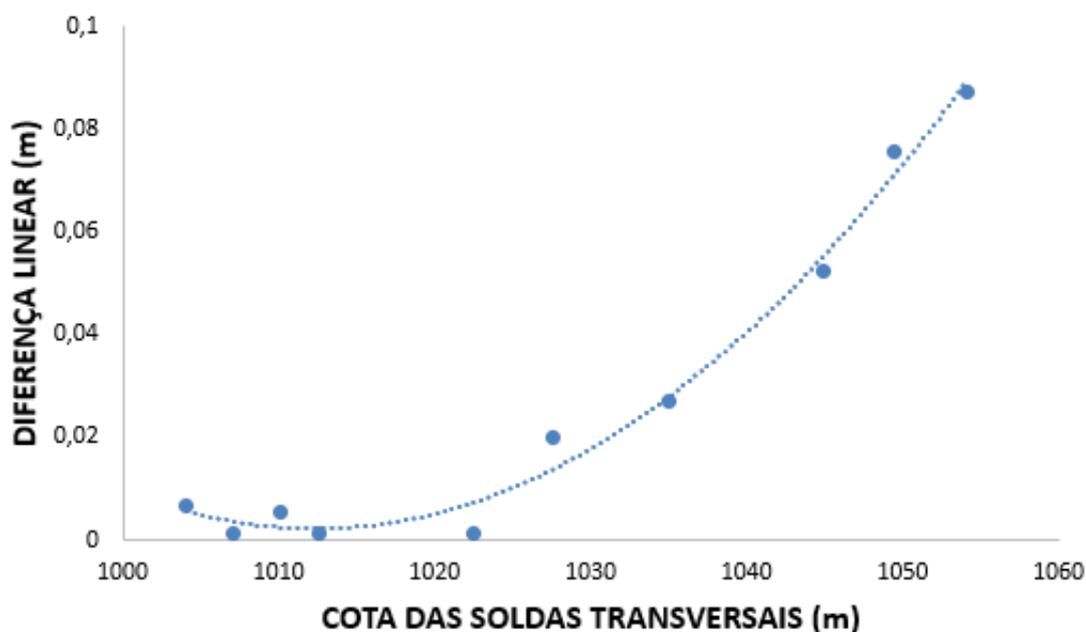
$$R^2 = 0,9869$$

Em que:

Δ = Diferença linear entre os respectivos centros geométricos;

C = Cotas das soldas transversais.

Figura 99 – Ajuste polinomial da função do deslocamento linear em relação a cota.



Fonte: O autor (2018).

A partir da Equação 157, o deslocamento linear entre o alinhamento de referência e do topo foi de 0,2590 m. A determinação da deflexão linear foi realizada através da Equação 116 e o resultado foi de $0^{\circ}8'44.88''$ para uma cota de 70 metros.

Conforme os resultados das duas campanhas, desconsiderando a direção da torre no instante da medição de bordas da primeira campanha, constata-se que a torre tem uma inclinação na direção Noroeste. Tais resultados podem ser consequente a força de arrasto devido a ação do vento na torre eólica, visto que a orientação da nascelle é coincidente com a direção de inclinação.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões finais da pesquisa, sugestões para os trabalhos futuros e as recomendações pertinentes.

5.1 CONCLUSÕES

A proposta desta dissertação é difundir a importância e a necessidade do monitoramento apropriado em torres eólicas *onshore*. Para tal fim, foi apresentado metodologias para verificar o nível digital e estações totais, recomendações para a definição das configurações geométricas e materialização dos pontos de referência no entorno da torre eólica, estabelecimento do Sistema de Referência de Medição a partir do levantamento GNSS, definição dos pontos-objeto na torre (adesivos refletivos e soldas transversais), medição através do uso dos métodos de medição das bordas e irradiação tridimensional e avaliação de possíveis recalques da fundação por meio de nivelamento geométrico de alta precisão. O monitoramento foi realizado por meio de duas campanhas de medição e todos os dados medidos foram ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados e tiveram suas propagações analisadas.

As configurações geométricas definidas para os pontos de referência tiveram a finalidade de observar com uma distância no mesmo alinhamento, todos os pontos-objeto nas diferentes alturas da torre sem o emprego de ocular de cotovelo (triângulo retângulo) e garantir observações na base e os pontos-objeto mais próximo e ter uma abrangência posicional para o monitoramento da torre eólica com o auxílio de ocular de cotovelo (hexágono regular).

Para assegurar o controle posicional e acompanhamento temporal da verticalidade da torre e base, foi definido um Sistema de Referência de Medição estável dos pontos de referência, obtidas por meio do levantamento GNSS por intermédio do método de posicionamento estático nos 03 vértices do triângulo e 01 vértice do hexágono, com desvios padrão planimétrico de $\pm 0,00922$ m.

As coordenadas foram transformadas de geodésica geocêntrica para geodésica geocêntrica (SGL) com o vértice L1 como origem ($X_0 = 150000,000$ m e $Y_0 = 250000,000$ m) e transportadas para os demais pontos de referência através da poligonização com centragem forçada, irradiação tridimensional, método de medição das bordas e nivelamento trigonométrico de visadas unilaterais. Os dados foram

cálculos, processados e ajustados por MMQ, apresentando desvios padrão planimétrico mínimo de $\pm 0,01503$ m e máximo com $\pm 0,01813$ m.

A primeira campanha de levantamentos foi prejudicada devido a fortes ventos e chuvas intensas. Entretanto, o movimento da torre durante os fortes ventos foi evidenciado nos resultados, corroborando a metodologia proposta para o monitoramento de torres eólicas. A segunda campanha tiveram resultados convincentes e mostraram com maior precisão e qualidade o comportamento da torre.

Foram utilizados os métodos de irradiação tridimensional e o método de medição de bordas para determinar as coordenadas do centro das soldas transversais. As coordenadas centrais das seções circulares foram definidas através das medições da solda transversal ST1 até a ST22. De forma geral, os resultados foram conformes na extensão da torre nas duas campanhas, sendo mais discrepantes nas soldas transversais a partir de ST14 devido aos maiores movimentos mais próximos do topo da torre.

O ajustamento de observações dos dados coletados, mediante o uso do modelo combinado e através do modelo paramétrico, respectivamente, das medições com o método de irradiação tridimensional e de medição de bordas, comprovaram a possibilidade de determinar a geometria e as coordenadas do centro de cada seção da torre. Os resultados das coordenadas (x, y) mais próximo da base, da mais alta e respectivos desvios padrão das seções circulares da primeira campanha de medição, através do método de irradiação tridimensional e ajustamento pelo modelo combinado foi de ($X_{ST3} = 149978,60735 \pm 0,00259$ m, $Y_{ST3} = 250099,63476 \pm 0,00325$ m) para ST3 e ($X_{ST22} = 149978,54634 \pm 0,01494$ m, $Y_{ST22} = 250099,66005 \pm 0,00636$ m) da ST22. Por meio do método de medição de bordas e ajustamento pelo modelo paramétrico os resultados foram para ST3 de ($X_{ST3} = 149978,59729 \pm 0,01154$ m, $Y_{ST3} = 250099,65514 \pm 0,00963$ m) e de ($X_{ST22} = 149978,59507 \pm 0,03792$ m, $Y_{ST22} = 250099,61927 \pm 0,03710$ m) na ST22. Os resultados das coordenadas (x, y) e respectivos desvios padrão das seções circulares da segunda campanha de medição, mediante o método de irradiação tridimensional e ajustamento pelo modelo combinado foi de ($X_{ST1} = 149978,61090 \pm 0,00074$ m, $Y_{ST1} = 250099,64793 \pm 0,00065$ m) da ST1 e para ST22 ($X_{ST22} = 149978,52136 \pm 0,01032$ m, $Y_{ST22} = 250099,66409 \pm 0,00896$ m). O resultado do método de medição de bordas e ajustamento pelo modelo paramétrico foram de ($X_{ST1} = 149978,61214 \pm 0,00292$ m, $Y_{ST1} = 250099,64399 \pm$

0,00369 m) para ST1 e para ST22 ($X_{ST22} = 149978,58747 \pm 0,01564$ m, $Y_{ST22} = 250099,67834 \pm 0,01567$ m).

Com o uso do método combinado foi possível determinar os raios com seus respectivos desvios padrão das seções circulares formadas pelas soldas transversais. Os resultados são coerentes e análogos na maioria das soldas transversais, exibindo a tendência dos raios em serem iguais ou menores com o aumento da altura da torre. Os raios com maiores discrepâncias são os com cotas maiores que a da ST14. Os resultados dos raios coesos medidos mais próximo da base (ST3) e da mais alta (ST22) além dos respectivos desvios padrão das seções circulares da primeira campanha de medição foi, respectivamente, $R_{ST3} = 1,83882 \pm 0,00208$ m e $R_{ST22} = 1,67422 \pm 0,00638$ m. Na segunda campanha os resultados foram $R_{ST1} = 1,84373 \pm 0,00049$ m para ST1 e $R_{ST22} = 1,72453 \pm 0,00687$ m.

A análise geral da verticalidade da torre a partir do ângulo de deflexão do alinhamento vertical de referência e o centro geométrico da ST22, foi realizado através do cálculo da média das deflexões dos resultados obtidos através do método de irradiação tridimensional da primeira campanha e segunda campanha, devido os resultados da medição de bordas terem sido prejudicados por causa das oscilações e vibrações da torre. O resultado da deflexão entre as coordenadas do centro da seção circular da ST22 e do alinhamento vertical de referência foi de $0^{\circ}2'39.22'' \pm 2.83''$ na direção Noroeste e diferença linear média de $0,0878 \pm 0,0078$ m. Foi realizado o ajuste de uma curva aos pontos medidos do centro geométrico das soldas transversais inferiores para determinar o ângulo de deflexão a solda transversal do topo da torre, definido a partir de uma função não linear ajustada por MMQ. O resultado foi de $0^{\circ}8'44.88''$ e diferença linear de 0,2590 m

Através da análise dos resultados, nota-se que as posições das coordenadas nas duas campanhas variam de acordo com o ângulo de incidência do vento, principalmente nas partes com maiores cotas da torre. Dessa forma, pode-se concluir que a consideração do ângulo em que o vento incide na estrutura é de fundamental importância para avaliar o comportamento da torre eólica, já que pode interferir diretamente na segurança estrutural da torre.

A metodologia proposta para avaliar os possíveis recalques da fundação, através dos pinos implantados nas bases das torres a serem monitoradas, por meio de nivelamento geométrico de alta precisão, serviram para demonstrar a possibilidade e necessidade para a auscultação do movimento vertical da torre eólica *onshore*. Os

resultados das duas campanhas através das cotas dos pinos implantados nas torres Gravatá 02 e Gravatá 01 evidenciam, respectivamente, maior diferença entre as cotas na RN01 com $0,00001 \text{ m} \pm 0,00006 \text{ m}$ e na RN06 com $0,00086 \text{ m} \pm 0,00053 \text{ m}$. Entretanto, mesmo que os resultados das diferenças das cotas entre as duas campanhas sejam nos centésimos de milímetros na Torre Gravatá 02 e no décimo de milímetros na Torre Gravatá 01, podendo a chegar no milímetro caso considere o máximo desvio padrão, não se pode considerar a não existência de recalques, uma vez que duas medições são poucas.

Nesta pesquisa foi provável apresentar a possibilidade e eficácia na aplicação de métodos geodésicos/topográficos, a partir do Sistema de Referência de Medição, para avaliar a verticalidade e a geometria da torre por intermédio de alvos refletivos alinhados com os pontos de referência do triângulo, soldas transversais entre os segmentos da torre e respectivas bordas. Os resultados expressam que os padrões prováveis de serem atingidos para os métodos de levantamentos utilizados foram conquistados.

É imprescindível a realização de observações em épocas distintas para a inspeção de possíveis deslocamentos temporal dos pontos-objeto comparando-se os resultados obtidos. Devido a indisponibilidade, não foi possível fixar alvos entorno da torre eólica, sendo utilizado as soldas transversais como pontos-objeto. Com os alvos seria possível garantir medições com maior qualidade no mesmo ponto durante as campanhas de medição, garantindo a realização mais precisa do monitoramento temporal. Nas soldas transversais foi padronizada medições dos segmentos inferiores, limitando a precisão de realizar a medição no mesmo ponto em diferentes épocas. Portanto, para que exista uma maior qualidade nos resultados, é necessário garantir que as mesmas condições e procedimentos realizados na primeira campanha sejam repetidos nas outras campanhas.

Através da metodologia proposta para o Sistema de Referência de Medição estável, são assegurados o controle posicional e acompanhamento temporal da verticalidade da torre e base, por meio dos métodos geodésicos e instrumentos de precisão adequados. Dessa maneira, é capaz analisar o menor desvio padrão e o maior entre as coordenadas dos vértices da poligonal implantada e analisar o desvio padrão menor e maior entre as coordenadas. É recomendado analisar a estabilidade dos pontos de referência para verificar possíveis diferenças entre as coordenadas de um mesmo ponto para as épocas de medição.

Por meio dos resultados atingidos durante as duas campanhas de medições, pode-se verificar que o monitoramento de torres eólicas *onshore* utilizando técnicas geodésicas fornece dados precisos e confiáveis sobre a real condição estrutural. Recomende-se a continuidade de pesquisas nestes tipos de estruturas, para avaliar o seu comportamento com o passar do tempo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Em função dos resultados obtidos e das análises realizadas, recomenda-se os seguintes tópicos:

- Analisar a estabilidade dos pontos de referência em cada campanha de medição para verificar possíveis diferenças entre as coordenadas de um mesmo ponto para as épocas de medição;
- Por indisponibilidade, as estações totais empregadas na dissertação eram de precisão média. Para o monitoramento desses tipos de estruturas, recomenda-se o uso de Estação Total com alta precisão, garantindo assim precisão nas medidas angulares e lineares necessárias no monitoramento;
- Implantação de adesivos de alvos refletivos na torre em diferentes alturas, com o intuito de servir como alvos para medições nas diferentes épocas;
- Realização das medições com turbina desligada, com o intuito de suprimir as propagações das vibrações geradas;
- Cautela durante as medições através do método da medição de bordas, por causa das oscilações e vibrações da torre, principalmente nas parcelas mais altas;
- Para avaliar a possibilidade de recalque é recomendado mais campanhas de medição.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração de eólica. 2017.** Disponível em: <<https://www.institutototum.com.br/images/totum/arquivos/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2017.
- ABNT. **NBR 13133 – Normas Técnicas para a Execução de levantamento topográfico.** Rio de Janeiro. 1994.
- ABNT. **NBR 14166 - Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento.** Rio de Janeiro. 1998.
- ABREU, M. A. **Análise da qualidade dos dados GPS: estudo de caso da estação de cananéia.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- ARELLANO, M. T. R. **Revisión del inventario y levantamiento de precisión de los puntos topográficos ubicados en el Campus Alfonso XIII de la UPCT.** Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, 2015.
- BARBOSA, L.G. **Propostas para Unificação do Sistema Altimétrico da Grande São Paulo.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.
- BORGES, A. C. **Topografia Aplicada à Engenharia Civil.** Editora Edgar Blucker Ltda., São Paulo, 1994.
- BRAMETAL (Brasil). **Suporte para aerogeradores.** Disponível em: <<http://www.brametal.com.br/produto/3/>>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- BRANDÃO, A.C. **Possibilidades de emprego de um campo de pontos planimétrico como definidor de um comparador de distâncias colineares.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, 1996.
- BERTUZZI, P. J. **Estudos de aspectos de engenharia para implantação de torres eólicas.** Trabalho de graduação, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2013.
- BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. BOSSANYI, E. **Wind Energy Handbook.** Inglaterra, 2001.
- CARDOSO, P.J.C. **Determinação controlada de deslocamentos verticais de pontos com linha de base GPS de 425 metros de extensão.** Dissertação de Mestrado. Recife, 2005.
- CARNEIRO, A.F.T. **Possibilidades metodológicas para obtenção de um campo de pontos com vistas ao cálculo do volume de objetos.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, 1993.

CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica; CRESESB, Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231>. Acesso em: 18 jul. 2018.

CHEN, Y. **Analysis of deformation surveys: A generalized method**. Department of Geodesy and Geomatics Engineering. Universidade de nova Brunswick. Canadá, 1983.

COELHO, L.A.N. **Acurácia na determinação das coordenadas dos vértices de imóveis urbanos**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2013.

CORTEN, G. P.; SABEL J. C. **Optical motion analysis of wind turbines**. In: Proceedings of European union wind energy conference. Goteborg, Sweden, 1996.

DAL'FORNO, G. L.; AGUIRRE A. J.; HILLEBRAND F. L.; GREGÓRIO F. V. **Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no plano topográfico local pelos métodos da norma NBR 14166:1998 e o de rotações e translações**. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2010.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. Editora da UFPR, Curitiba, 2004.

DEPARTMENT OF ARMY – U. S. **Deformation monitoring and control surveying**. Washington, DC, 1994.

DEUMLICH, F. **Surveying Instruments**. Walter de Gruyter, Berlin, 1982.

DNV (DET NORSKE VERITAS); RISO (RISO NATIONAL LABORATORY). **Guidelines for Design of Wind Turbines**. 2. ed. Dinamarca, 2002.

DUMBY, A. H. J. M. **Aspetos de dimensionamento de torres eólicas tubulares em aço**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de ciência e tecnologia universidade de Coimbra, 2014.

DRAGOMIR, P. I.; NEGRILĂ, A.F.C.; SĂRĂCIN A. **Geodesic techniques used to monitoring the wind turbines towers**. RevCAD, 2014.

EC21. **Wind Tower Flange & Ring Forging**. 2012. Disponível em: <https://bx17.en.ec21.com/Wind_Tower_Flange_Ring_Forging-6737756_6737757.htm>. Acesso em: 10 jul. 2018.

Eólica Gravatá. **Fundação Gravatá**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <eolica@eolica.com.br> data de recebimento, 17 jul. 2018.

ERBA, D.A.; THUM, B. A.; SILVA, C.A. da; SOUZA, G.C. de; VERONEZ, M. R.; LEANDRO, R. F.; MAIA, T.C. B. **Topografia para estudantes de Arquitetura, Engenharia e Geologia**. 2005.

ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. Porto Alegre: Globo, 1987.

ENGSTRÖM, S.; LYRNER, T.; HASSANZADEH, M.; STALIN, T.; JOHANSSON, J. **Tall towers for large wind turbines**. Report from Vindforsk project V-342 Höga torn för vindkraftverk. Elforsk rapport, 2010.

FARIA, P. O.; NORONHA, M. **Fundações de Torres Eólicas - Estudo de Caso**. In: INFOGEO 2005 - Simpósio Brasileiro de Aplicações de Informática em Geotecnia, Belo Horizonte, 2005.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. INPE, 2001.

FORTES, L.P.S. **Operacionalização da rede brasileira de monitoramento contínuo do sistema GPS (RBMC)**. Dissertação (Mestrado), Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1997.

FOLSTER, K. **Influence of Geometry on the Dynamic Behaviour of Steel Tubular Towers for Onshore Wind Turbines**. Tese de doutorado, Universidade de Cape Town. África do Sul, 2016.

FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. **Altitude e Geopotencial**. IGES Bulletin N.9, pp 47 – 62 – International Geoid Service, Milan, 1999.

GARNÉS, S. J. A.; **Programa AstGeoTop**. *Software* de cálculo, Universidade Federal de Pernambuco- Recife, Brasil. Versão 2017.

GARNÉS, S. J. A. **Sistema de Projeção e Orientação das Plantas Topográficas**. In: COBRAC 98 – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário – UFSC – Florianópolis, 1998.

GARNÉS, S. J. A.; SIQUEIRA, V. P.; CACHO, J. P. **Definição para implantação do sistema topográfico local de Campo Grande-MS e análise das fórmulas da NBR-14.166**. In: Anais do IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, UFPR, 2005.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GEMAEL C. **Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1981.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary surveying: An introduction to geomatics**. 13th ed. Pearson, 1997.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind statistics**. 2017. Disponível em: <http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2018.

GROSSE-SCHWIEP, M.; PIECHEL J.; LUHMANN T. **Measurement of Rotor Blade Deformations of Wind Energy Converters with Laser Scanners**. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013.

HAU, E. **Wind turbines fundamentals, technologies, application, economics**. Springer Verlag. Berlin/Heidelberg, 2000.

HESSE, C.; HEER, R.; HORST, S.; NEUNER, H. **A concept for monitoring wind energy turbines with geodetic techniques**. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, 2006.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

IBGE. Resolução nº 22, de 1983. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro**. 1983.

IBGE. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS**. 2008.

INCRA. **Manual Técnico de Posicionamento – Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 1. Ed. Brasília: INCRA, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **(ISO) 17123-1: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 1: Theory**. International Organization for Standardization. Suíça, 2001.

JEKELI, C. **Geometric Reference Systems in Geodesy**. Ohio State University, Lecture Note. 2002.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying**. Berlin. 1988. Ed. de Gruyter.

KRELLING, P. C. L. **Concepção de um Inclímetro Foto Mecânico para controle Geodésico de Estruturas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

KOGLER, J. **Propagação de erros**. 2008. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/718049/mod_resource/content/1/Propagac%CC%A7a%CC%83o%20de%20Erros%20-%20JK%202009.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018.

KUANG, S. **Geodetic Network Analysis and Optimal design: Concepts and Applications**. Chelsa, Michigan: Ann Arbor Press, 1996.

LEICA GEOSYSTEMS. **TPS – system 1000 programs: User's manual. Version 2.4**. Suíça, 2006.

- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1995.
- LOUBSER, P.B.; JACOBS, A.R. **Optimised design of wind turbine gravity foundations**. In: Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, África de Sul, 2016.
- ÖZTÜRK, F. **Finite element modelling of tubular bolted connection of a lattice wind tower for fatigue assessment**. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2016.
- PARQUE EÓLICO CAITHNESS. **Boletim anual de geração de eólica: Summary of Wind Turbine Accident**. 2018. Disponível em: <<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- PIMENTEL, C. C. **Metodologia para controle de recalques em estruturas de concreto armado por meio de nivelamento geométrico de precisão**. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Sul, 2012.
- PROWELL, I. **An Experimental and Numerical Study of Wind Turbine Seismic Behavior**. Tese de doutorado, Universidade da Califórnia. São Diego, 2011.
- MARQUES, J. M. **O método da análise de componentes principais na detecção e identificação de outliers múltiplos em fototriangulação**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, 1994.
- MATOS, L. C. L. J. **Avaliação experimental das perturbações causadas por diferentes tipos de sistema de controle em Usinas Eólicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.
- MEDINA, A. S. **Classificação de teodolitos e estações totais NA UFPR**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1998.
- METALICA. **V 164-8, o maior gerador eólico do mundo já está em funcionamento**. Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/v-164-8-o-maior-gerador-eolico-do-mundo-ja-esta-em-funcionamento>>. Acesso em: 29 jul. 2019.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. - São Paulo: Editora UNESP, 2008.
- MOREIRA, A.S.B. **Nivelamento Trigonométrico e Nivelamento Geométrico classe IIN da NB4 13.133: Limites e condições de compatibilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- MOREIRA, D.; SIQUEIRA, R. M.; MENEGHETTI, L. **Topografia**. 2008. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/fatecsp.br/decio/apostila-de-topografia>>. Acesso em: 08 ago. 2018.

NADAL, C.A. **Método da interseção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, 2000.

NETTO, N. P.; BLITZKOW, D.; BUENO, R. F; FONSECA, E. S.; MAZZILLI, C. E. N.; LACHAPPELLE G. **Structural Monitoring Using GPS Receivers**. In: 3ª Assembléia Luso-espanhola de Geodésia e Geofísica, Espanha, Valência, 2002.

PROFESSIONAL SURVEYOR MAGAZINE. **DIN 18723 Specification for theodolite Accuracy**. Professional Surveyor Magazine, 2002.

OZBEK, M.; RIXEN D. J.; ERNE, O.; SANOW, G. **Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry**. Energy, 2010.

RODRIGUES, F.P.M.; GAGG, G.; BRISOTTO, G; KLEIN, I.; PEREIRA, T. **Considerações envolvidas no planejamento para locação de eixos de pontes**. In: II Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia na UFRGS, 2007.

REZO, A.; BRANIMIR, M.; SLAVICA, B. **Geodetic Works during the Establishment of Wind Power Plants**. In: SIG 2016 – International Symposium on Engineering Geodesy. Croácia, 2016.

ROY, S. K. **Fundamentals of Surveying**. PHI, 1999.

RUGGIERO, M.; LOPES, V. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. São Paulo: Makron Books, 1997.

SEIXAS, A.; BURITY, E.F. **Geodésia aplicada à medição e ao monitoramento de áreas de risco em sítios industrializados**. In: IV CBCG, Curitiba-PR, 2005.

SEIXAS, A.; SEIXAS, J. R. **Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG CTG/UFPE**. Projeto de Pesquisa nº 3076.040512/2015-15 Propesq/UFPE, 2015.

SILVA, A. S. **Optimisation of surveying monitoring networks**. Universidade de Nottingham: Tese de Doutorado. Nottingham, 1997.

SILVA, M. M. S.; NADAL, C. A.; VEIGA, L. A. K. **Desenvolvimento de metodologias para classificações angulares, detecção de erros de gradação de limbos e determinação da distância focal de teodolitos e estações totais em laboratório**. In: II Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente, 2007.

SILVA, I.; SEGANTINE, P.C.L. **Topografia para Engenharia: TEORIA E PRÁTICA DE GEOMÁTICA**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, T. F.; SEIXAS, A.; ROMÃO, V. M. **Conceituação de Campos de Pontos na Medida de Deformação de Objetos**. In: I SIMGEO - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SILVA, E. V.; SEIXAS, A. O estabelecimento de padrões de referência metrológica: controle e análise da qualidade de estruturas geodésicas altimétricas implantadas no campus recife da UFPE. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº 69/9. 2017.

SILVA, T. R. F.; SEIXAS, A. **Verificação metrológica da qualidade de uma estação total: implantação de pontos de apoio e estudos de comandos embutidos**. XXV Congresso Nacional de Iniciação Científica – CONIC 2017, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017b.

SIQUEIRA, A. S. **Comportamento estrutural de torres de aço para suporte de Turbinas Eólicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro., 2008.

SLAMA, C. C. **Manual of Photogrammetry**. 4th edition. American Society of Photogrammetry. 1056 p. 1980.

SVENSSON, H. **Design of foundations for wind turbines**. Dissertação de mestrado, Universidade de Lund. Suécia, 2010.

TORGE, W. **Geodäsie**, 3. Ed. Gruyter Lehrbuch, 2001.

THRESHER, R.; SCHRECK, S.; ROBINSON, M.; VEERS, P. **Wind Energy Status and Future Wind Engineering Challenges**. In: Proceedings of the American Association of Wind Engineering Workshop, Colorado, 2008.

VEIGA, L. A.; ZANETT, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Universidade Federal do Paraná. 2012. Disponível em: <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/topo2/apos_topo.pdf>. Acesso em: 09 Maio 2018.

VIANA, S. F. A. C. **Modelação de Micro-Sistemas Híbridos Fotovoltaicos/Eólicos para Produção Descentralizada**. Tese de doutorado, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2010.

VESTAS. **V82-1.65 MW: Creating more from less. 2018**. Disponível em: <<https://www.edprnorthamerica.com/wp-content/uploads/2014/04/V82.pdf>>. Acesso em: 20 Jan. 2018.

VIALI, L. **Estatística Básica: Teste de Hipóteses**. 2016. Disponível em: <<http://www.mat.ufrgs.br/~viali/exatas/material/apostilas/Tespara.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

WAY, A C.; VAN ZIJL, G. P. A. G. **A study on the design and material costs of tall wind turbine towers in South Africa**. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2015.

WIDERSKI, T.; KURAŁOWICZ, Z. **Geodesic Monitoring of Tower and Mast Structures**. Reports on Geodesy, 411-417, 2009.

WIND TURBINE MODELS. **Vestas V63**. Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/821-vestas-v63>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

ZONTA, C. **Monitoramento geodésico tridimensional aplicado em ensaios estruturais de painéis compensados de madeira**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012

APÊNDICE A – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

Soldas Transversais	L1(PD) (m)	L1(PI) (m)	L2(PD) (m)	L2(PI) (m)	L3(PD) (m)	L3(PI) (m)
ST1	1001,13127	1001,10041	—	—	—	—
ST2	1004,11257	1004,07905	1004,11408	1004,11963	1004,11726	1004,11994
ST3	1007,07630	1007,04809	1007,06218	1007,07322	1007,07934	1007,08784
ST4	1010,05233	1010,01914	1010,02914	1010,04938	1010,04903	1010,05397
ST5	1012,52625	1012,50099	1012,51310	1012,52720	1012,52926	1012,52874
ST6	1015,01017	1014,98735	1014,99753	1015,00874	1015,01256	1015,02121
ST7	1017,48860	1017,46454	1017,51690	1017,48721	1017,50226	1017,49631
ST8	1019,96490	1019,94125	1019,94778	1019,96473	1019,97642	1019,97229
ST9	1022,46309	1022,43705	1022,44978	1022,46808	1022,47400	1022,46973
ST10	1025,02948	1025,01032	1025,02213	1025,03879	1025,04597	1025,03361
ST11	1027,51179	1027,48591	1027,50534	1027,51688	1027,52071	1027,52578
ST12	1029,98625	1029,96751	1029,97622	1029,98667	1029,99987	1029,99545
ST13	1032,46945	1032,45347	1032,45676	1032,47814	1032,48843	1032,48795
ST14	1034,95358	1034,92394	1034,93514	1034,94839	1034,96325	1034,96396
[ST15	1037,42666	1037,40741	1037,41958	1037,43468	1037,44924	1037,44389
ST16	1039,90345	1039,89505	1039,90397	1039,91499	1039,91596	1039,92723
ST17	1042,39605	1042,36913	1042,38192	1042,40380	1042,42093	1042,39981
ST18	1044,85249	1044,84417	1044,84885	1044,85965	1044,87644	1044,86602
ST19	1047,20552	1047,19124	1047,20854	1047,21918	1047,23312	1047,22857
ST20	1049,47357	1049,49187	1049,48597	1049,50728	1049,50918	1049,50513
ST21	1051,77253	1051,77103	1051,76640	1051,77874	1051,76448	1051,79075
ST22	1054,05347	1054,05085	1054,05792	1054,07583	1054,07396	1054,06546
ST23	—	—	—	—	1056,38350	1056,38799
ST24	—	—	—	—	1058,68687	1058,70284
ST25	—	—	—	—	1060,98260	1061,01469
ST26	—	—	—	—	1063,32415	1063,34990

APÊNDICE B COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

Soldas Transversais	LP1(PD) (m)	LP1(PI) (m)	LP2(PD) (m)	LP2(PI) (m)	LP3(PD) (m)	LP3(PI) (m)
ST1	1001,12659	1001,11686	—	—	1001,12659	1001,11686
ST2	1004,10879	1004,09761	1003,85233	1003,84188	1004,10879	1004,09761
ST3	1007,07281	1007,06350	1006,70332	1006,70956	1007,07281	1007,06350
ST4	1010,04350	1010,03404	1009,60129	1009,57794	1010,04350	1010,03404
ST5	1012,52153	1012,51124	1011,99166	1011,98226	1012,52153	1012,51124
AR1	1001,04590	1001,03484	—	—	—	—
AR2	1003,12645	1003,11519	—	—	—	—
AR3	—	—	1003,22796	1003,22610	—	—
AR4	—	—	1003,13030	1003,12956	—	—
AR5	—	—	—	—	1001,08857	1001,08662
AR6	—	—	—	—	1001,15249	1003,25634

APÊNDICE C COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST1	149979,01498	149979,00222	—	—	—	—
ST2	149979,01506	149978,99126	149979,82934	149979,82884	149976,85429	149976,85345
ST3	149979,01425	149978,87730	149979,95090	149979,95838	149976,85695	149976,85789
ST4	149979,01243	149978,84092	149979,96119	149979,95153	149976,85173	149976,84525
ST5	149979,01421	149978,82361	149979,96161	149979,94254	149976,85826	149976,85545
ST6	149979,01257	149978,81279	149979,95548	149979,94901	149976,85500	149976,85515
ST7	149979,01139	149978,78910	149979,81451	149979,94968	149976,85404	149976,85028
ST8	149979,01121	149978,76729	149979,95840	149979,94926	149976,84744	149976,84533
ST9	149979,01046	149978,74462	149979,95897	149979,95041	149976,85145	149976,84551
ST10	149979,01097	149978,71712	149979,96284	149979,95072	149976,83957	149976,84891
ST11	149979,00917	149978,69810	149979,95390	149979,94565	149976,84852	149976,85381
ST12	149979,00943	149978,68199	149979,95843	149979,95061	149976,84658	149976,83868
ST13	149979,00961	149978,66319	149979,95473	149979,93956	149976,85164	149976,85152
ST14	149979,01028	149978,64704	149979,95470	149979,94263	149976,84991	149976,84729
ST15	149979,00705	149978,62992	149979,94946	149979,94017	149976,85706	149976,85891
ST16	149979,00475	149978,60921	149979,95127	149979,93945	149976,84198	149976,84223
ST17	149979,00579	149978,59706	149979,95730	149979,93553	149976,84201	149976,82925
ST18	149979,00456	149978,58389	149979,95217	149979,93908	149976,84073	149976,81256
ST19	149978,99091	149978,57172	149979,90686	149979,88737	149976,89961	149976,88717
ST20	149978,98373	149978,56345	149979,86081	149979,83491	149976,95914	149976,91903
ST21	149978,96659	149978,54719	149979,82311	149979,81250	149976,95268	149976,94215
ST22	149978,96053	149978,52922	149979,78732	149979,76582	149976,95376	149976,99688
ST23	—	—	—	—	149977,01661	149977,06405
ST24	—	—	—	—	149977,07656	149977,12088
ST25	—	—	—	—	149977,12565	149977,18515
ST26	—	—	—	—	149977,15574	149977,26567

APÊNDICE D COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)	LP3(PD)	LP3(PI)
ST1	149976,86611	149976,86652			149978,99599	149978,99296
ST2	149976,86817	149976,86706	149977,23900	149977,27851	149978,99559	149978,99341
ST3	149976,86825	149976,86713	149977,24307	149977,31214	149978,99439	149978,99318
ST4	149976,86022	149976,85888	149977,24786	149977,35765	149978,99390	149978,99210
ST5	149976,85865	149976,86149	149977,24149	149977,39395	149978,99366	149978,99134
AR1	149976,84131	149976,84084	—	—	—	—
AR2	149976,87026	149976,86896	—	—	—	—
AR3	—	—	149976,83695	149976,83364	—	—
AR4	—	—	149978,96864	149978,96974	—	—
AR5	—	—	—	—	149978,99140	149978,99257
AR6	—	—	—	—	149978,99325	149978,99070

APÊNDICE E COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST1	250097,83808	250097,89063	—	—	—	—
ST2	250097,83772	250097,94406	250100,77379	250100,77005	250100,20059	250100,20086
ST3	250097,84152	250098,47302	250100,88378	250100,88862	250100,19974	250100,19943
ST4	250097,85000	250098,64495	250100,89250	250100,88240	250100,20142	250100,20350
ST5	250097,84169	250098,72332	250100,89288	250100,87421	250100,19931	250100,20022
ST6	250097,84932	250098,77376	250100,88730	250100,88010	250100,20087	250100,20031
ST7	250097,85485	250098,88418	250100,75898	250100,88137	250100,20118	250100,20188
ST8	250097,85565	250098,98822	250100,88995	250100,88098	250100,20331	250100,20348
ST9	250097,85916	250099,09389	250100,89048	250100,88203	250100,20151	250100,20291
ST10	250097,85677	250099,22213	250100,89400	250100,88166	250100,20533	250100,20181
ST11	250097,86517	250099,31078	250100,88586	250100,87835	250100,20245	250100,20023
ST12	250097,86396	250099,38587	250100,88998	250100,88352	250100,20358	250100,20511
ST13	250097,86080	250099,47355	250100,88596	250100,87346	250100,20195	250100,20097
ST14	250097,85769	250099,54881	250100,88593	250100,87560	250100,20251	250100,20234
ST15	250097,87276	250099,62866	250100,88182	250100,87336	250100,20021	250100,19859
ST16	250097,88349	250099,72518	250100,88281	250100,87271	250100,20456	250100,20396
ST17	250097,87631	250099,78185	250100,88830	250100,86848	250100,20455	250100,20814
ST18	250097,88207	250099,84561	250100,88363	250100,87171	250100,20496	250100,21352
ST19	250097,94568	250099,89996	250100,84239	250100,82464	250100,18804	250100,18949
ST20	250097,97916	250099,93854	250100,80047	250100,77690	250100,16989	250100,17923
ST21	250098,05907	250100,01435	250100,76616	250100,75650	250100,17095	250100,17178
ST22	250098,08734	250100,10047	250100,73358	250100,71401	250100,16907	250100,15416
ST23	—	—	—	—	250100,14882	250100,13304
ST24	—	—	—	—	250100,12952	250100,11473
ST25	—	—	—	—	250100,11371	250100,09403
ST26	—	—	—	—	250100,10402	250100,06861

APÊNDICE F – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)	LP3(PD)	LP3(PI)
ST1	250097,84047	250097,85178	—	—	250100,24925	250100,24728
ST2	250097,84232	250097,84969	250098,41921	250098,45118	250100,24839	250100,24711
ST3	250097,84789	250097,85074	250098,41974	250098,47757	250100,24836	250100,24708
ST4	250097,85017	250097,85580	250098,43166	250098,52651	250100,25094	250100,24973
ST5	250097,85128	250097,85932	250098,43063	250098,56320	250100,25144	250100,22883
AR1	250097,84610	250097,84711	—	—	—	—
AR2	250097,84857	250097,84939	—	—	—	—
AR3	—	—	250100,20642	250100,20152	—	—
AR4	—	—	250097,83442	250097,83170	—	—
AR5	—	—	—	—	250100,25721	250100,22883
AR6	—	—	—	—	250100,23093	250100,25572

APÊNDICE G- MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Coord_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149979,01506	149978,99126	0,02380	149979,00316	0,00028	0,01683	0,00001
ST3	149979,01425	149978,87730	0,13695	149978,94577	0,00938	0,09684	0,00006
ST4	149979,01243	149978,84092	0,17151	149978,92667	0,01471	0,12127	0,00008
ST5	149979,01421	149978,82361	0,19060	149978,91891	0,01816	0,13478	0,00009
ST6	149979,01257	149978,81279	0,19978	149978,91268	0,01996	0,14127	0,00009
ST7	149979,01139	149978,78910	0,22228	149978,90025	0,02470	0,15718	0,00010
ST8	149979,01121	149978,76729	0,24392	149978,88925	0,02975	0,17248	0,00012
ST9	149979,01046	149978,74462	0,26584	149978,87754	0,03534	0,18798	0,00013
ST10	149979,01097	149978,71712	0,29386	149978,86405	0,04318	0,20779	0,00014
ST11	149979,00917	149978,69810	0,31107	149978,85364	0,04838	0,21996	0,00015
ST12	149979,00943	149978,68199	0,32744	149978,84571	0,05361	0,23153	0,00015
ST13	149979,00961	149978,66319	0,34643	149978,83640	0,06001	0,24496	0,00016
ST14	149979,01028	149978,64704	0,36324	149978,82866	0,06597	0,25685	0,00017
ST15	149979,00705	149978,62992	0,37713	149978,81848	0,07111	0,26667	0,00018
ST16	149979,00475	149978,60921	0,39553	149978,80698	0,07822	0,27968	0,00019
ST17	149979,00579	149978,59706	0,40873	149978,80142	0,08353	0,28902	0,00019
ST18	149979,00456	149978,58389	0,42067	149978,79422	0,08848	0,29746	0,00020
ST19	149978,99091	149978,57172	0,41919	149978,78132	0,08786	0,29641	0,00020
ST20	149978,98373	149978,56345	0,42028	149978,77359	0,08832	0,29718	0,00020
ST21	149978,96659	149978,54719	0,41940	149978,75689	0,08795	0,29656	0,00020
ST22	149978,96053	149978,52922	0,43130	149978,74487	0,00028	0,01683	0,00001

APÊNDICE H – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149979,82934	149979,82884	0,00050	149979,82909	0,00000	0,00036	0,00000
ST3	149979,95838	149979,95090	0,00748	149979,95464	0,00003	0,00529	0,00000
ST4	149979,96119	149979,95153	0,00966	149979,95636	0,00005	0,00683	0,00000
ST5	149979,96161	149979,94254	0,01907	149979,95208	0,00018	0,01348	0,00001
ST6	149979,95548	149979,94901	0,00647	149979,95225	0,00002	0,00457	0,00000
ST7	149979,94968	149979,81451	0,13518	149979,88210	0,00914	0,09558	0,00006
ST8	149979,95840	149979,94926	0,00914	149979,95383	0,00004	0,00646	0,00000
ST9	149979,95897	149979,95041	0,00856	149979,95469	0,00004	0,00605	0,00000
ST10	149979,96284	149979,95072	0,01212	149979,95678	0,00007	0,00857	0,00001
ST11	149979,95390	149979,94565	0,00825	149979,94978	0,00003	0,00583	0,00000
ST12	149979,95843	149979,95061	0,00782	149979,95452	0,00003	0,00553	0,00000
ST13	149979,95473	149979,93956	0,01517	149979,94714	0,00012	0,01073	0,00001
ST14	149979,95470	149979,94263	0,01206	149979,94867	0,00007	0,00853	0,00001
ST15	149979,94946	149979,94017	0,00929	149979,94482	0,00004	0,00657	0,00000
ST16	149979,95127	149979,93945	0,01182	149979,94536	0,00007	0,00836	0,00001
ST17	149979,95730	149979,93553	0,02177	149979,94641	0,00024	0,01539	0,00001
ST18	149979,95217	149979,93908	0,01309	149979,94562	0,00009	0,00926	0,00001
ST19	149979,90686	149979,88737	0,01950	149979,89712	0,00019	0,01379	0,00001
ST20	149979,86081	149979,83491	0,02590	149979,84786	0,00034	0,01831	0,00001
ST21	149979,82311	149979,81250	0,01061	149979,81781	0,00006	0,00750	0,00001
ST22	149979,78732	149979,76582	0,02150	149979,77657	0,00023	0,01520	0,00001

APÊNDICE I – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}$ (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	149976,85429	149976,85345	0,00084	149976,85387	0,00000	0,00059	0,00000
ST3	149976,85789	149976,85695	0,00094	149976,85742	0,00000	0,00067	0,00000
ST4	149976,85173	149976,84525	0,00648	149976,84849	0,00002	0,00458	0,00000
ST5	149976,85826	149976,85545	0,00281	149976,85686	0,00000	0,00199	0,00000
ST6	149976,85515	149976,85500	0,00015	149976,85508	0,00000	0,00011	0,00000
ST7	149976,85404	149976,85028	0,00376	149976,85216	0,00001	0,00266	0,00000
ST8	149976,84744	149976,84533	0,00211	149976,84639	0,00000	0,00149	0,00000
ST9	149976,85145	149976,84551	0,00594	149976,84848	0,00002	0,00420	0,00000
ST10	149976,84891	149976,83957	0,00934	149976,84424	0,00004	0,00660	0,00000
ST11	149976,85381	149976,84852	0,00529	149976,85117	0,00001	0,00374	0,00000
ST12	149976,84658	149976,83868	0,00790	149976,84263	0,00003	0,00559	0,00000
ST13	149976,85164	149976,85152	0,00012	149976,85158	0,00000	0,00009	0,00000
ST14	149976,84991	149976,84729	0,00262	149976,84860	0,00000	0,00185	0,00000
ST15	149976,85891	149976,85706	0,00186	149976,85799	0,00000	0,00131	0,00000
ST16	149976,84223	149976,84198	0,00026	149976,84211	0,00000	0,00018	0,00000
ST17	149976,84201	149976,82925	0,01275	149976,83563	0,00008	0,00902	0,00001
ST18	149976,84073	149976,81256	0,02818	149976,82664	0,00040	0,01992	0,00001
ST19	149976,89961	149976,88717	0,01244	149976,89339	0,00008	0,00880	0,00001
ST20	149976,95914	149976,91903	0,04011	149976,93908	0,00080	0,02837	0,00002
ST21	149976,95268	149976,94215	0,01052	149976,94742	0,00006	0,00744	0,00000
ST22	149976,99688	149976,95376	0,04312	149976,97532	0,00093	0,03049	0,00002

APÊNDICE J – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

n	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	149978,99599	149978,99296	0,00303	149978,99447	0,00000	0,00214	$1,4310^{-6}$
ST2	149978,99559	149978,99341	0,00218	149978,99450	0,00000	0,00154	$1,0310^{-6}$
ST3	149978,99439	149978,99318	0,00121	149978,99379	0,00000	0,00085	$5,7010^{-7}$
ST4	149978,99390	149978,99210	0,00180	149978,99300	0,00000	0,00128	$8,5110^{-7}$
ST5	149978,99366	149978,99134	0,00232	149978,99250	0,00000	0,00164	$1,1010^{-6}$

APÊNDICE K – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149977,27851	149977,23900	0,03951	149977,25875	0,00078	0,02794	$1,8610^{-5}$
ST3	149977,31214	149977,24307	0,06907	149977,27761	0,00239	0,04884	$3,2610^{-5}$
ST4	149977,35765	149977,24786	0,10979	149977,30276	0,00603	0,07763	$5,1810^{-5}$
ST5	149977,39395	149977,24149	0,15246	149977,31772	0,01162	0,10781	$7,1910^{-5}$

APÊNDICE L – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}$ (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST1	149976,86652	149976,86611	0,00042	149976,86632	0,00000	0,00029	$1,9610^{-7}$
ST2	149976,86817	149976,86706	0,00111	149976,86762	0,00000	0,00078	$5,2210^{-7}$
ST3	149976,86825	149976,86713	0,00112	149976,86769	0,00000	0,00079	$5,2610^{-7}$
ST4	149976,86022	149976,85888	0,00135	149976,85955	0,00000	0,00095	$6,3410^{-7}$
ST5	149976,86149	149976,85865	0,00283	149976,86007	0,00000	0,00200	$1,3310^{-7}$

APÊNDICE M – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}$ (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	250097,94406	250097,83772	0,10634	250097,89089	0,00565	0,07519	0,00003
ST3	250098,47302	250097,84152	0,63150	250098,15727	0,19940	0,44654	0,00018
ST4	250098,64495	250097,85000	0,79495	250098,24748	0,31597	0,56211	0,00022
ST5	250098,72332	250097,84169	0,88164	250098,28251	0,38864	0,62341	0,00025
ST6	250098,77376	250097,84932	0,92445	250098,31154	0,42730	0,65368	0,00026
ST7	250098,88418	250097,85485	1,02933	250098,36951	0,52976	0,72785	0,00029
ST8	250098,98822	250097,85565	1,13256	250098,42193	0,64135	0,80084	0,00032
ST9	250099,09389	250097,85916	1,23473	250098,47653	0,76228	0,87309	0,00035
ST10	250099,22213	250097,85677	1,36536	250098,53945	0,93210	0,96545	0,00039
ST11	250099,31078	250097,86517	1,44561	250098,58798	1,04489	1,02220	0,00041
ST12	250099,38587	250097,86396	1,52191	250098,62491	1,15811	1,07615	0,00043
ST13	250099,47355	250097,86080	1,61274	250098,66718	1,30047	1,14038	0,00046
ST14	250099,54881	250097,85769	1,69112	250098,70325	1,42995	1,19581	0,00048
ST15	250099,62866	250097,87276	1,75589	250098,75071	1,54158	1,24160	0,00050
ST16	250099,72518	250097,88349	1,84168	250098,80433	1,69590	1,30227	0,00052
ST17	250099,78185	250097,87631	1,90554	250098,82908	1,81554	1,34742	0,00054
ST18	250099,84561	250097,88207	1,96354	250098,86384	1,92774	1,38843	0,00056
ST19	250099,89996	250097,94568	1,95428	250098,92282	1,90961	1,38189	0,00055
ST20	250099,93854	250097,97916	1,95938	250098,95885	1,91958	1,38549	0,00055
ST21	250100,01435	250098,05907	1,95529	250099,03671	1,91157	1,38260	0,00055
ST22	250100,10047	250098,08734	2,01313	250099,09390	2,02635	1,42350	0,00057

APÊNDICE N – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}$ (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	250100,77379	250100,77005	0,00374	250100,77192	0,00001	0,00264	0,00000
ST3	250100,88862	250100,88378	0,00484	250100,88620	0,00001	0,00342	0,00000
ST4	250100,89250	250100,88240	0,01010	250100,88745	0,00005	0,00714	0,00000
ST5	250100,89288	250100,87421	0,01867	250100,88354	0,00017	0,01320	0,00001
ST6	250100,88730	250100,88010	0,00720	250100,88370	0,00003	0,00509	0,00000
ST7	250100,88137	250100,75898	0,12239	250100,82017	0,00749	0,08654	0,00003
ST8	250100,88995	250100,88098	0,00897	250100,88547	0,00004	0,00634	0,00000
ST9	250100,89048	250100,88203	0,00845	250100,88625	0,00004	0,00597	0,00000
ST10	250100,89400	250100,88166	0,01234	250100,88783	0,00008	0,00873	0,00000
ST11	250100,88586	250100,87835	0,00751	250100,88211	0,00003	0,00531	0,00000
ST12	250100,88998	250100,88352	0,00646	250100,88675	0,00002	0,00457	0,00000
ST13	250100,88596	250100,87346	0,01250	250100,87971	0,00008	0,00884	0,00000
ST14	250100,88593	250100,87560	0,01033	250100,88077	0,00005	0,00730	0,00000
ST15	250100,88182	250100,87336	0,00846	250100,87759	0,00004	0,00598	0,00000
ST16	250100,88281	250100,87271	0,01010	250100,87776	0,00005	0,00714	0,00000
ST17	250100,88830	250100,86848	0,01981	250100,87839	0,00020	0,01401	0,00001
ST18	250100,88363	250100,87171	0,01191	250100,87767	0,00007	0,00842	0,00000
ST19	250100,84239	250100,82464	0,01775	250100,83352	0,00016	0,01255	0,00001
ST20	250100,80047	250100,77690	0,02357	250100,78868	0,00028	0,01667	0,00001
ST21	250100,76616	250100,75650	0,00966	250100,76133	0,00005	0,00683	0,00000
ST22	250100,73358	250100,71401	0,01957	250100,72379	0,00019	0,01384	0,00001

APÊNDICE O – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}$ (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	250100,20086	250100,20059	0,00027	250100,20073	0,00000	0,00019	0,00000
ST3	250100,19974	250100,19943	0,00030	250100,19958	0,00000	0,00022	0,00000
ST4	250100,20350	250100,20142	0,00209	250100,20246	0,00000	0,00148	0,00000
ST5	250100,20022	250100,19931	0,00091	250100,19976	0,00000	0,00064	0,00000
ST6	250100,20087	250100,20031	0,00056	250100,20059	0,00000	0,00040	0,00000
ST7	250100,20188	250100,20118	0,00070	250100,20153	0,00000	0,00049	0,00000
ST8	250100,20348	250100,20331	0,00017	250100,20339	0,00000	0,00012	0,00000
ST9	250100,20291	250100,20151	0,00140	250100,20221	0,00000	0,00099	0,00000
ST10	250100,20533	250100,20181	0,00352	250100,20357	0,00001	0,00249	0,00000
ST11	250100,20245	250100,20023	0,00221	250100,20134	0,00000	0,00157	0,00000
ST12	250100,20511	250100,20358	0,00152	250100,20434	0,00000	0,00108	0,00000
ST13	250100,20195	250100,20097	0,00098	250100,20146	0,00000	0,00069	0,00000
ST14	250100,20251	250100,20234	0,00018	250100,20242	0,00000	0,00013	0,00000
ST15	250100,20021	250100,19859	0,00162	250100,19940	0,00000	0,00114	0,00000
ST16	250100,20456	250100,20396	0,00059	250100,20426	0,00000	0,00042	0,00000
ST17	250100,20814	250100,20455	0,00360	250100,20635	0,00001	0,00254	0,00000
ST18	250100,21352	250100,20496	0,00856	250100,20924	0,00004	0,00606	0,00000
ST19	250100,18949	250100,18804	0,00146	250100,18876	0,00000	0,00103	0,00000
ST20	250100,17923	250100,16989	0,00934	250100,17456	0,00004	0,00661	0,00000
ST21	250100,17178	—	—	—	—	—	—
ST22	250100,16907	—	—	—	—	—	—

APÊNDICE P – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250097,85178	250097,84047	0,01131	250097,84613	0,00006	0,00800	$3,2010^{-6}$
ST2	250097,84969	250097,84232	0,00737	250097,84601	0,00003	0,00521	$2,0810^{-6}$
ST3	250097,85074	250097,84789	0,00285	250097,84931	0,00000	0,00202	$8,0610^{-7}$
ST4	250097,85580	250097,85017	0,00562	250097,85299	0,00002	0,00398	$1,5910^{-6}$
ST5	250097,85932	250097,85128	0,00804	250097,85530	0,00003	0,00569	$2,2710^{-6}$

APÊNDICE Q – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	250098,45118	250098,41921	0,03197	250098,43520	0,00051	0,02260	$9,0410^{-6}$
ST3	250098,47757	250098,41974	0,05783	250098,44865	0,00167	0,04089	$1,6410^{-5}$
ST4	250098,52651	250098,43166	0,09484	250098,47909	0,00450	0,06706	$2,6810^{-5}$
ST5	250098,56320	250098,43063	0,13256	250098,49692	0,00879	0,09374	$3,7510^{-5}$

APÊNDICE R – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA PRIMEIRA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250100,24925	250100,24728	0,00198	250100,24827	0,00000	0,00140	$5,5910^{-7}$
ST2	250100,24839	250100,24711	0,00128	250100,24775	0,00000	0,00091	$3,6310^{-7}$
ST3	250100,24836	250100,24708	0,00128	250100,24772	0,00000	0,00091	$3,6210^{-7}$
ST4	250100,25094	250100,24973	0,00121	250100,25033	0,00000	0,00085	$3,4110^{-7}$
ST5	250100,25144	250100,24890	0,00255	250100,25017	0,00000	0,00180	$7,2010^{-7}$

APÊNDICE S – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST1	0°0'3.49"	0°0'20,50"	—	—	—	—
ST2	0°0'0"	0°0'20,00"	359°59'2,00"	359°59'28,00"	359°59'45,50"	359°59'56,00"
ST3	359°59'53.48"	0°0'9,50"	359°59'4,00"	359°59'34,00"	359°59'47,00"	359°59'55,50"
ST4	359°59'58.48"	0°0'10,00"	359°59'5,00"	359°59'35,00"	359°59'49,00"	359°59'54,00"
ST5	0°0'0.504'	0°0'0,50"	359°59'10,50"	359°59'48,50"	359°59'53,00"	0° 0'4,50"
ST6	359°59'57.98"	0°0'26,50"	359°59'15,50"	359°59'52,00"	359°59'52,00"	359°59'46,00"
ST7	359°59'57.01"	0°0' 1,00"	359°59'21,00"	359°59'56,50"	359°59'51,00"	359°59'56,50"
ST8	359°59'56.00"	0°0' 4,00"	359°59'25,00"	359°59'58,00"	359°59'45,00"	359°59'48,50"
ST9	359°59'43.00"	0°0'5,50"	359°59'31,50"	0°0'15,00"	359°59'38,00"	359°59'49,50"
ST10	—	—	359°59'40,50"	0°0'12,50"	359°59'30,50"	359°59'33,00"
ST11	—	—	359°59'39,00"	0°0'25,50"	359°59'29,50"	359°59'40,50"
ST12	—	—	359°59'49,00"	0°0'42,50"	359°59'25,50"	359°59'4,50"
ST13	—	—	359°59'47,00"	0°0'37,00"	359°59'11,50"	359°59'8,00"
ST14	359°59'20.00"	359°59'38,50"	359°59'41,00"	0°0'52,50"	359°59'9,99"	359°58'56,00"
ST15	—	—	359°59'18,50"	0°0'35,50"	359°59'8,00"	359°58'55,50"
ST16	—	—	359°59'38,00"	0°0'42,50"	359°59'12,00"	—
ST17	—	—	359°59'40,50"	0°1'25,00"	359°59'3,99"	—
ST18	359°59'9.49"	359°59'30,50"	359°59'41,50"	0°1'12"	359°58'40,00"	—
ST19	—	—	0°0'1,00"	0°1'3"	359°59'4,50"	—
ST20	—	—	0°1'10,00"	0°0'47,50"	359°58'53,00"	—
ST21	—	—	0°1' 11,00"	0°1'16,5"	359°58'57,50"	—
ST22	0°2'29.00"	—	0°0'35,00"	0°1'49,00"	359°59'16,00"	—
ST23	—	—	—	—	359°59'54,00"	—
ST24	—	—	—	—	359°59'36,00"	—

APÊNDICE T – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 E LP2 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)
ST1	330°03'20.99"	330°03'23.00"	60°07'50.00"	60°07'3.50"
ST2	330°03'29.00"	330°03'32.50"	60°08'1.49"	60°08'18.99"
ST3	330°03'14.00"	330°03'24.00"	60°07'32.49"	60°07'49.00"
ST4	330°03'15.99"	330°03'14.00"	60°07'14.49"	60°07'33.49"
ST5	330°03' 5.50"	330°03'10.50"	60°07'50.00"	60°07'3.50"

APÊNDICE U – RESULTADO DO MMQ-MODELO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	R (m)	σ_R (m)	χ^2
ST2	149978,52028	0,00089	250099,55501	0,00111	1,78714	0, 00072	0,05160
ST3	149978,60735	0,00259	250099,63476	0,00325	1,83882	0,00208	0,45843
ST4	149978,60117	0,00455	250099,64320	0,00164	1,83973	0,00118	1,41690
ST5	149978,60510	0,00789	250099,63333	0,00281	1,83769	0,00206	4,23612
ST6	149978,60288	0,00283	250099,63888	0,00101	1,83585	0,00074	0,54687
ST7	149978,59842	0,00183	250099,64158	0,00070	1,83384	0,00087	0,08451
ST8	149978,59731	0,00379	250099,64596	0,00136	1,83751	0,00098	0,98835
ST9	149978,59887	0,00394	250099,64836	0,00143	1,83591	0,00102	1,06787
ST10	149978,59767	0,00583	250099,64883	0,00211	1,83907	0,00150	2,33836
ST11	149978,59662	0,00367	250099,64889	0,00132	1,83079	0,00094	0,92367
ST12	149978,59433	0,00377	250099,65288	0,00136	1,83644	0,00096	0,98004
ST13	149978,59571	0,00575	250099,64436	0,00205	1,83092	0,00147	2,26779
ST14	149978,59509	0,00470	250099,64375	0,00167	1,83366	0,00120	1,51703
ST15	149978,59670	0,00373	250099,64957	0,00135	1,82357	0,00096	0,95831
ST16	149978,58487	0,00453	250099,66026	0,00163	1,82568	0,00113	1,42239
ST17	149978,57498	0,00635	250099,65070	0,00251	1,82593	0,00297	1,03151
ST18	149978,58418	0,00918	250099,65975	0,00408	1,82668	0,00366	1,84268
ST19	149978,57118	0,00589	250099,65542	0,00225	1,76050	0,00278	0,88963
ST20	149978,58328	0,01823	250099,63997	0,00789	1,70828	0,00727	7,21468
ST21	149978,54482	0,00488	250099,67712	0,00202	1,67209	0,00224	0,62342
ST22	149978,51796	0,01482	250099,66883	0,00616	1,67422	0,00638	4,96249

APÊNDICE V – RESULTADO DO MMQ-MODELO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	R (m)	σ_R (m)	χ^2
ST1	149975,68435	0,82998	250097,05732	0,73531	3,40282	0,97782	0,01772
ST2	149978,61221	0,00652	250099,65008	0,00577	1,84412	0,00566	0,34769
ST3	149978,61340	0,00264	250099,65367	0,00234	1,84401	0,00230	0,05677
ST4	149978,62944	0,00516	250099,67742	0,00458	1,86030	0,00452	0,20770
ST5	149978,61836	0,00776	250099,66898	0,00700	1,85185	0,00640	0,48124

APÊNDICE W – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	χ^2
ST2	149978,59726	0,01245	250099,65644	0,01039	3,52364
ST3	149978,59729	0,01154	250099,65514	0,00963	3,02935
ST4	149978,59875	0,01206	250099,65509	0,01006	3,30833
ST5	149978,59975	0,01219	250099,65071	0,01017	3,37680
ST6	149978,60187	0,01034	250099,65380	0,00862	2,42987
ST7	149978,60092	0,01030	250099,65206	0,00862	2,42841
ST8	149978,60233	0,00888	250099,65404	0,00740	1,79097
ST9	149978,60645	0,00716	250099,64932	0,00597	1,16601
ST10	149978,60766	0,00779	250099,65214	0,00478	0,46762
ST11	149978,60940	0,01159	250099,64989	0,00712	1,03633
ST12	149978,62432	0,01462	250099,65547	0,00898	1,64908
ST13	149978,62532	0,01216	250099,65788	0,00747	1,14027
ST14	149978,61539	0,01369	250099,65630	0,01142	4,26047
ST15	149978,62057	0,01892	250099,66356	0,01163	2,76201
ST16	149978,62342	0,02597	250099,65732	0,01838	1,88828
ST17	149978,63897	0,04207	250099,65647	0,02979	4,95654
ST18	149978,61234	0,01598	250099,65236	0,01887	8,17883
ST19	149978,63836	0,02496	250099,65641	0,01767	1,74473
ST20	149978,65768	0,00906	250099,65616	0,00641	0,22978
ST21	149978,66391	0,00221	250099,65182	0,00157	0,01373
ST22	149978,59507	0,03792	250099,61927	0,03710	19,62677

APÊNDICE X – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 E LP2 (PRIMEIRA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	χ^2
ST2	149978,61108	0,00108	250099,65092	0,00166	0,12913
ST3	149978,60942	0,00064	250099,64730	0,00099	0,04584
ST4	149978,60753	0,00081	250099,65224	0,00124	0,07273
ST5	149978,60533	0,00041	250099,65567	0,00063	0,01861

APÊNDICE Y – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

Soldas Transversais	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST2	1004,09381	1004,10206	1004,13661	1004,11691	1004,10891	1004,08942
ST5	1012,51392	1012,52065	1012,55693	1012,53721	1012,53515	1012,51367
ST9	1022,45382	1022,45551	1022,49640	1022,46808	1022,47214	1022,44103
ST11	1027,50510	1027,51205	1027,55108	1027,52250	1027,51731	1027,50747
ST14	1034,94356	1034,95666	1034,98663	1034,96412	1034,95930	1034,94785
ST18	1044,85564	1044,86246	1044,89606	1044,88409	1044,86536	1044,84898
ST20	1049,48675	1049,48962	1049,53105	1049,51205	1049,50361	1049,49720
ST22	1054,06545	1054,06295	1054,11063	1054,09582	1054,07110	1054,03723

APÊNDICE Z – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)	LP3(PD)	LP3(PI)
ST1	1001,10973	1001,10009	—	—	—	—
ST2	1004,10951	1004,10963	1004,10163	1004,10567	1004,10163	1004,10567
ST3	1007,07645	1007,06462	1007,06675	1007,07297	1007,06675	1007,07297
ST4	1010,04731	1010,03421	1010,04268	1010,04136	1010,04268	1010,04136
ST5	1012,52512	1012,51133	1012,51874	1012,52043	1012,51874	1012,52043
AR1	1001,04676	1001,03641	—	—	—	—
AR2	1003,12830	1003,11635	—	—	—	—
AR5	—	—	—	—	1001,05383	1001,05480
AR6	—	—	—	—	1003,22382	1003,22538

APÊNDICE AA – COTAS DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP4(PD)	LP4(PI)	LP5(PD)	LP5(PI)	LP6(PD)	LP6(PI)
ST1	1001,11864	1001,11803	1001,13585	1001,13062	1004,10828	1004,10043
ST2	1004,14886	1004,11792	1004,11758	1004,11594	1007,07442	1007,06938
ST3	1007,07948	1007,08210	1007,08474	1007,08487	1010,04384	1010,03849
ST4	1010,04749	1010,05009	1010,04906	1010,05295	1012,52254	1012,51771
ST5	1012,52597	1012,52839	1012,53278	1012,52933	1004,10828	1004,10043
AR3	—	—	1001,07104	1001,07222	—	—
AR4	—	—	1003,23073	1003,23333	—	—

APÊNDICE AB – COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	L1(PD) (m)	L1(PI) (m)	L2(PD) (m)	L2(PI) (m)	L3(PD) (m)	L3(PI) (m)
ST2	149979,01055	149979,00837	149979,96552	149979,96892	149976,87262	149976,86888
ST5	149979,00827	149979,00930	149979,95104	149979,95590	149976,85606	149976,86464
ST9	149979,00421	149979,00621	149979,97124	149979,96620	149976,83692	149976,86496
ST11	149979,00148	149979,00458	149979,95684	149979,94524	149976,83946	149976,85181
ST14	149979,00176	149979,00338	149979,95271	149979,93540	149976,82844	149976,86195
ST18	149979,00275	149979,00373	149979,96004	149979,93163	149976,80998	149976,85422
ST20	149978,97536	149978,97835	149979,85576	149979,84333	149976,88963	149976,97345
ST22	149978,95440	149978,95825	149979,76118	149979,76744	149976,96864	149976,99694

APÊNDICE AC – COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP1(PD) (m)	LP1(PI) (m)	LP2(PD) (m)	LP2(PI) (m)	LP3(PD) (m)	LP3(PI) (m)
ST1	149978,95673 1	149978,95763 0			149976,85785 6	149976,85821 4
ST2	149978,95651 1	149978,95669 8	149977,68551 5	149977,68652 1	149976,86221 2	149976,86257 0
ST3	149978,95623 0	149978,95672 2	149977,68474 0	149977,68669 4	149976,86194 1	149976,86229 9
ST4	149978,95528 6	149978,95595 0	149977,68910 9	149977,68632 5	149976,85064 2	149976,85106 0
ST5	149978,95523 2	149978,95545 4	149977,68857 5	149977,68983 1	149976,85758 8	149976,85794 6
AR1	149978,95673 1	149978,95763 0	—	—	149976,85785 6	149976,85821 4
AR2	149978,95651 1	149978,95669 8	—	—	—	—
AR3	—	—	149979,97658	149979,97572	—	—
AR4	—	—	149979,97338	149979,97250	—	—
AR5	—	—	—	—	149976,85617 0	149976,85694 6
AR6	—	—	—	—	149976,83621 7	149976,85939 7

APÊNDICE AD – COORDENADA X DOS PONTOS-OBJETO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP4(PD) (m)	LP4(PI) (m)	LP5(PD) (m)	LP5(PI) (m)	LP6(PD) (m)	LP6(PI) (m)
ST1	149977,81264 8	149977,81266 5	149979,97549 2	149979,97400 1	—	—
ST2	149977,81302 7	149977,81284 4	149979,97428 6	149979,97479 3	149980,45320 1	149980,43980 4
ST3	149977,81314 2	149977,81309 1	149979,97032 7	149979,96871 3	149980,44722 1	149980,43178 4
ST4	149977,81190 5	149977,81243 7	149979,97415 5	149979,97492 4	149980,44972 8	149980,43346 8
ST5	149977,81085 7	149977,81098 2	149979,97032 7	149979,96871 3	149980,45074 6	149980,43697 7
AR3	—	—	149979,97658 2	149979,97572 1	—	—
AR4	—	—	149979,97338 0	149979,97250 0	—	—

APÊNDICE AE – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	L1(PD) (m)	L1(PI) (m)	L2(PD) (m)	L2(PI) (m)	L3(PD) (m)	L3(PI) (m)
ST2	250097,84488	250097,84349	250100,89808	250100,89789	250100,19099	250100,19321
ST5	250097,85088	250097,84144	250100,88358	250100,88539	250100,19734	250100,19509
ST9	250097,86979	250097,85586	250100,90197	250100,89476	250100,20351	250100,19499
ST11	250097,88250	250097,86343	250100,88886	250100,87568	250100,20218	250100,19922
ST14	250097,88120	250097,87596	250100,88510	250100,86869	250100,20522	250100,19596
ST18	250097,87659	250097,87204	250100,89177	250100,86461	250100,21167	250100,19845
ST20	250098,00429	250097,98803	250100,79686	250100,78358	250100,18602	250100,16004
ST22	250098,10199	250098,08403	250100,71077	250100,71516	250100,16057	250100,15299

APÊNDICE AF – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP1(PD) (m)	LP1(PI) (m)	LP2(PD) (m)	LP2(PI) (m)	LP3(PD) (m)	LP3(PI) (m)
ST1	250097,83765	250097,83707			250100,22181	250100,22292
ST2	250097,83867	250097,84139	250098,05809	250098,05898	250100,22041	250100,22152
ST3	250097,83997	250097,84128	250098,05741	250098,05913	250100,22049	250100,22161
ST4	250097,84434	250097,84485	250098,06150	250098,05880	250100,22392	250100,22522
ST5	250097,84459	250097,84715	—	—	250100,22189	250100,22301
AR1	250097,83788	250097,83831	—	—	—	—
AR2	250097,83896	250097,84209	—	—	—	—
AR5	—	—	—	—	250100,22071	250100,22312
AR6	—	—	—	—	250100,22876	250100,22254

APÊNDICE AG – COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

Pontos Objeto	LP4(PD) (m)	LP4(PI) (m)	LP5(PD) (m)	LP5(PI) (m)	LP6(PD) (m)	LP6(PI) (m)
ST1	250101,30971	250101,30768	250100,89011	250100,88876	—	—
ST2	250101,30786	250101,30681	250100,88875	250100,88948	250099,55662	250099,56582
ST3	250101,30730	250101,30560	250100,88515	250100,88394	250099,55862	250099,56850
ST4	250101,31334	250101,30879	250100,88890	250100,88933	250099,55798	250099,56793
ST5	250101,31846	250101,31496	250100,88515	250100,88394	250099,55744	250099,56615
AR3	—	—	—	250100,89084	250100,89032	—
AR4	—	—	—	250100,88793	250100,88765	—

APÊNDICE AH – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149979,01055	149979,00837	0,00218	149979,00946	$2 \cdot 10^{-6}$	0,00154	$1 \cdot 10^{-6}$
ST5	149979,00930	149979,00827	0,00103	149979,00878	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00073	$5 \cdot 10^{-6}$
ST9	149979,00621	149979,00421	0,00200	149979,00521	$2 \cdot 10^{-6}$	0,00141	$9 \cdot 10^{-6}$
ST11	149979,00458	149979,00148	0,00310	149979,00303	$5 \cdot 10^{-6}$	0,00219	$1 \cdot 10^{-6}$
ST14	149979,00338	149979,00176	0,00162	149979,00257	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00115	$8 \cdot 10^{-7}$
ST18	149979,00373	149979,00275	0,00097	149979,00324	$5 \cdot 10^{-7}$	0,00069	$5 \cdot 10^{-7}$
ST20	149978,97835	149978,97536	0,00299	149978,97685	$4 \cdot 10^{-6}$	0,00211	$1 \cdot 10^{-6}$
ST22	149978,95825	149978,95440	0,00385	149978,95632	$7 \cdot 10^{-6}$	0,00272	$1 \cdot 10^{-6}$

APÊNDICE AI - MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149979,96892	149979,96552	0,00339	149979,96722	$6 \cdot 10^{-6}$	0,00240	$2 \cdot 10^{-6}$
ST5	149979,95590	149979,95104	0,00487	149979,95347	$1 \cdot 10^{-5}$	0,00344	$2 \cdot 10^{-6}$
ST9	149979,97124	149979,96620	0,00504	149979,96872	$1 \cdot 10^{-5}$	0,00357	$2 \cdot 10^{-6}$
ST11	149979,95684	149979,94524	0,01160	149979,95104	$6 \cdot 10^{-5}$	0,00821	$5 \cdot 10^{-6}$
ST14	149979,95271	149979,93540	0,01731	149979,94406	$1 \cdot 10^{-4}$	0,01224	$8 \cdot 10^{-6}$
ST18	149979,96004	149979,93163	0,02841	149979,94583	$4 \cdot 10^{-4}$	0,02009	$1 \cdot 10^{-5}$
ST20	149979,85576	149979,84333	0,01243	149979,84955	$7 \cdot 10^{-5}$	0,00879	$6 \cdot 10^{-6}$
ST22	149979,76744	149979,76118	0,00626	149979,76431	$2 \cdot 10^{-5}$	0,00443	$3 \cdot 10^{-6}$

APÊNDICE AJ – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149976,87262	149976,86888	0,00373	149976,87075	$7 \cdot 10^{-6}$	0,00264	$2 \cdot 10^{-6}$
ST5	149976,86464	149976,85606	0,00858	149976,86035	$3 \cdot 10^{-5}$	0,00606	$4 \cdot 10^{-6}$
ST9	149976,86496	149976,83692	0,02804	149976,85094	$3 \cdot 10^{-4}$	0,01983	$1 \cdot 10^{-5}$
ST11	149976,85181	149976,83946	0,01236	149976,84564	$7 \cdot 10^{-5}$	0,00874	$6 \cdot 10^{-6}$
ST14	149976,86195	149976,82844	0,03351	149976,84519	$5 \cdot 10^{-4}$	0,02369	$1 \cdot 10^{-5}$
ST18	149976,85422	149976,80998	0,04424	149976,83210	$9 \cdot 10^{-4}$	0,03128	$2 \cdot 10^{-5}$
ST20	149976,97345	149976,88963	0,08382	149976,93154	0,003513	0,05927	$4 \cdot 10^{-5}$
ST22	149976,99694	149976,96864	0,02830	149976,98279	0,000400	0,02001	$1 \cdot 10^{-5}$

APÊNDICE AK – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	149978,95763	149978,95673	0,00090	149978,95718	$4 \cdot 10^{-7}$	0,00064	$4 \cdot 10^{-7}$
ST2	149978,95670	149978,95651	0,00019	149978,95660	$2 \cdot 10^{-7}$	0,00013	$1 \cdot 10^{-7}$
ST3	149978,95672	149978,95623	0,00049	149978,95648	$1 \cdot 10^{-8}$	0,00035	$2 \cdot 10^{-7}$
ST4	149978,95595	149978,95529	0,00066	149978,95562	$2 \cdot 10^{-7}$	0,00047	$3 \cdot 10^{-7}$
ST5	149978,95545	149978,95523	0,00022	149978,95534	$2 \cdot 10^{-8}$	0,00016	$1 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AL – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	149977,68652	149977,68551	0,00101	149977,68602	$5 \cdot 10^{-7}$	0,00071	$5 \cdot 10^{-7}$
ST3	149977,68669	149977,68474	0,00195	149977,68572	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00138	$9 \cdot 10^{-7}$
ST4	149977,68911	149977,68632	0,00278	149977,68772	$3 \cdot 10^{-6}$	0,00197	$1 \cdot 10^{-6}$
ST5	149977,68983	149977,68857	0,00126	149977,68920	$8 \cdot 10^{-7}$	0,00089	$6 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AM – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	149976,85821	149976,85786	0,00036	149976,85804	$6 \cdot 10^{-8}$	0,00025	$2 \cdot 10^{-7}$
ST2	149976,86257	149976,86221	0,00036	149976,86239	$6 \cdot 10^{-8}$	0,00025	$2 \cdot 10^{-7}$
ST3	149976,86230	149976,86194	0,00036	149976,86212	$6 \cdot 10^{-8}$	0,00025	$2 \cdot 10^{-7}$
ST4	149976,85106	149976,85064	0,00042	149976,85085	$9 \cdot 10^{-8}$	0,00030	$2 \cdot 10^{-7}$
ST5	149976,85795	149976,85759	0,00036	149976,85777	$6 \cdot 10^{-8}$	0,00025	$2 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AN – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	149977,81266	149977,81265	0,00002	149977,81266	$1 \cdot 10^{-10}$	0,00001	$8 \cdot 10^{-10}$
ST2	149977,81303	149977,81284	0,00018	149977,81294	$2 \cdot 10^{-8}$	0,00013	$1 \cdot 10^{-7}$
ST3	149977,81314	149977,81309	0,00005	149977,81312	$1 \cdot 10^{-9}$	0,00004	$2 \cdot 10^{-7}$
ST4	149977,81244	149977,81191	0,00053	149977,81217	$1 \cdot 10^{-7}$	0,00038	$3 \cdot 10^{-7}$
ST5	149977,81098	149977,81086	0,00012	149977,81092	$1 \cdot 10^{-8}$	0,00009	$1 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AO – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP5 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	149979,97549	149979,97400	0,00149	149979,97475	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00105	$7 \cdot 10^{-7}$
ST2	149979,97479	149979,97429	0,00051	149979,97454	$1 \cdot 10^{-7}$	0,00036	$2 \cdot 10^{-7}$
ST3	149979,97033	149979,96871	0,00161	149979,96952	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00114	$8 \cdot 10^{-7}$
ST4	149979,97492	149979,97416	0,00077	149979,97454	$3 \cdot 10^{-7}$	0,00054	$4 \cdot 10^{-7}$
ST5	149979,97033	149979,96871	0,00161	149979,96952	$1 \cdot 10^{-6}$	0,00114	$8 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AP – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA X DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP6 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV (%)
ST2	149980,45320	149980,43980	0,01340	149980,44650	0,000090	0,00947	0,000006
ST3	149980,44722	149980,43178	0,01544	149980,43950	0,000119	0,01092	0,000007
ST4	149980,44973	149980,43347	0,01626	149980,44160	0,000132	0,01150	0,000008
ST5	149980,45075	149980,43698	0,01377	149980,44386	0,000095	0,00974	0,000006

APÊNDICE AQ – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250097,83765	250097,83707	0,00058	250097,83736	0,00000	0,00041	$1 \cdot 10^{-7}$
ST2	250097,84139	250097,83867	0,00272	250097,84003	0,00000	0,00192	$8 \cdot 10^{-7}$
ST3	250097,84128	250097,83997	0,00131	250097,84062	0,00000	0,00093	$4 \cdot 10^{-7}$
ST4	250097,84485	250097,84434	0,00051	250097,84460	0,00000	0,00036	$1 \cdot 10^{-7}$
ST5	250097,84715	250097,84459	0,00256	250097,84587	0,00000	0,00181	$7 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AR – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP2 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	250098,05898	250098,05809	0,00088	250098,05854	0,00000	0,00062	$2 \cdot 10^{-7}$
ST3	250098,05913	250098,05741	0,00171	250098,05827	0,00000	0,00121	$5 \cdot 10^{-7}$
ST4	250098,06150	250098,05880	0,00270	250098,06015	0,00000	0,00191	$8 \cdot 10^{-7}$
ST5	250098,06188	250098,06104	0,00084	250098,06146	0,00000	0,00060	$2 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AS – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP3 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250100,22292	250100,22181	0,00111	250100,22236	0,00000	0,00079	$3 \cdot 10^{-7}$
ST2	250100,22152	250100,22041	0,00111	250100,22096	0,00000	0,00079	$3 \cdot 10^{-7}$
ST3	250100,22161	250100,22049	0,00111	250100,22105	0,00000	0,00079	$3 \cdot 10^{-7}$
ST4	250100,22522	250100,22392	0,00130	250100,22457	0,00000	0,00092	$3 \cdot 10^{-7}$
ST5	250100,22301	250100,22189	0,00111	250100,22245	0,00000	0,00079	$3 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AT – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250101,30971	250101,30768	0,00203	250101,30870	0,00000	0,00144	$5 \cdot 10^{-7}$
ST2	250101,30786	250101,30681	0,00106	250101,30733	0,00000	0,00075	$3 \cdot 10^{-7}$
ST3	250101,30730	250101,30560	0,00170	250101,30645	0,00000	0,00120	$5 \cdot 10^{-7}$
ST4	250101,31334	250101,30879	0,00455	250101,31107	0,00001	0,00322	$1 \cdot 10^{-6}$
ST5	250101,31846	250101,31496	0,00349	250101,31671	0,00001	0,00247	$1 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AU – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP5 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST1	250100,89011	250100,88876	0,00136	250100,88944	0,00000	0,00096	$3 \cdot 10^{-7}$
ST2	250100,88948	250100,88875	0,00072	250100,88912	0,00000	0,00051	$2 \cdot 10^{-7}$
ST3	250100,88515	250100,88394	0,00121	250100,88454	0,00000	0,00085	$3 \cdot 10^{-7}$
ST4	250100,88933	250100,88890	0,00044	250100,88912	0,00000	0,00031	$1 \cdot 10^{-7}$
ST5	250100,88515	250100,88394	0,00121	250100,88454	0,00000	0,00085	$3 \cdot 10^{-7}$

APÊNDICE AV – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA LP6 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$Cota_{média}(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	250099,56582	250099,55662	0,00920	250099,56122	0,00004	0,00650	$3 \cdot 10^{-6}$
ST3	250099,56850	250099,55862	0,00988	250099,56356	0,00005	0,00699	$3 \cdot 10^{-6}$
ST4	250099,56793	250099,55798	0,00995	250099,56296	0,00005	0,00704	$3 \cdot 10^{-6}$
ST5	250099,56615	250099,55744	0,00871	250099,56179	0,00004	0,00616	$3 \cdot 10^{-6}$

APÊNDICE AW – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L1 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	$média(m)$	$\sigma^2(m)$	$\sigma(m)$	CV(%)
ST2	250097,84488	250097,84349	0,00139	250097,84418	0,00000	0,00098	$4 \cdot 10^{-7}$
ST5	250097,85088	250097,84144	0,00944	250097,84616	0,00004	0,00667	$2 \cdot 10^{-6}$
ST9	250097,86979	250097,85586	0,01393	250097,86282	0,00010	0,00985	$4 \cdot 10^{-6}$
ST11	250097,88250	250097,86343	0,01907	250097,87297	0,00018	0,01348	$5 \cdot 10^{-6}$
ST14	250097,88120	250097,87596	0,00524	250097,87858	0,00001	0,00371	$1 \cdot 10^{-6}$
ST18	250097,87659	250097,87204	0,00454	250097,87432	0,00001	0,00321	$1 \cdot 10^{-6}$
ST20	250098,00429	250097,98803	0,01625	250097,99616	0,00013	0,01149	$4 \cdot 10^{-6}$
ST22	250098,10199	250098,08403	0,01796	250098,09301	0,00016	0,01270	$5 \cdot 10^{-6}$

APÊNDICE AX – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L2 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	média (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	250100,89808	250100,89789	0,00019	250100,89798	0,00000	0,00013	510^{-8}
ST5	250100,88539	250100,88358	0,00181	250100,88448	0,00000	0,00128	510^{-7}
ST9	250100,90197	250100,89476	0,00721	250100,89837	0,00003	0,00510	210^{-6}
ST11	250100,88886	250100,87568	0,01318	250100,88227	0,00009	0,00932	310^{-6}
ST14	250100,88510	250100,86869	0,01641	250100,87690	0,00013	0,01160	410^{-6}
ST18	250100,89177	250100,86461	0,02717	250100,87819	0,00037	0,01921	710^{-6}
ST20	250100,79686	250100,78358	0,01328	250100,79022	0,00009	0,00939	310^{-6}
ST22	250100,71516	250100,71077	0,00439	250100,71296	0,00001	0,00310	110^{-6}

APÊNDICE AY – MEDIDAS DE DISPERSÃO DAS COORDENADA Y DAS SOLDAS TRANSVERSAIS SOBRE OS PONTOS DE REFERÊNCIA L3 DA SEGUNDA CAMPANHA.

ST	Máximo (m)	Mínimo (m)	Amplitude(m)	média (m)	σ^2 (m)	σ (m)	CV(%)
ST2	250100,19321	250100,19099	0,00222	250100,19210	0,00000	0,00157	610^{-7}
ST5	250100,19734	250100,19509	0,00225	250100,19621	0,00000	0,00159	610^{-7}
ST9	250100,20351	250100,19499	0,00852	250100,19925	0,00004	0,00603	210^{-6}
ST11	250100,20218	250100,19922	0,00296	250100,20070	0,00000	0,00209	810^{-7}
ST14	250100,20522	250100,19596	0,00926	250100,20059	0,00004	0,00655	210^{-6}
ST18	250100,21167	250100,19845	0,01323	250100,20506	0,00009	0,00935	310^{-6}
ST20	250100,18602	250100,16004	0,02598	250100,17303	0,00034	0,01837	710^{-6}
ST22	250100,16057	250100,15299	0,00758	250100,15678	0,00003	0,00536	210^{-6}

APÊNDICE AZ – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST2	16°30'20.99"	16°30'21.49"	359°59'50.49"	359°59'45.49"	0°0'6.99"	0°0'9"
ST5	16°30'16.49"	16°30'16.49"	359°59'51.00"	359°59'46.49"	0°0'6.99"	0°0'10"
ST9	16°29'58.99"	16°30'6.99"	0°0'9"	0°0'14.00"	0°0'6.99"	0°0'0.50"
ST11	16°29'47.00"	16°29'50.49"	0°0'18"	0°0'14.50"	0°0'2.49"	0°0'1"
ST14	16°28'57.00"	16°29'16.50"	0°0'56.00"	0°0'43.49"	0°0'9"	0°0'6"
ST18	16°28'45.50"	16°29'4.49"	0°1'3.50"	0°1'11.49"	0°0'32.50"	0°0'1,50"
ST20	16°28'57.50"	16°29'7.50"	0°1'53.50"	0°1'52.5"	359°30'43.99"	359°30'22.50"
ST22	16°28'31.50"	16°28'37.49"	0°1'17.00"	0°2'0.99"	359°30'30.49"	359°30'2.99"

APÊNDICE BA – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	LP1(PD)	LP1(PI)	LP2(PD)	LP2(PI)	LP3(PD)	LP3(PI)
ST1	330°03'58.5"	330°03'14.49"			60°03'49.49"	60°03'51.00"
ST2	330°03'9.00"	330°03'14.00"	60°08'20.00"	60°08'25.50"	60°03'42.00"	60°03'38.99"
ST3	330°03'58.50"	330°03'5.00"	60°08'20.00"	60°08'23.49"	60°03'38.00"	60°03'32.00"
ST4	330°03'59.00"	330°03'7.50"	60°08'1.49"	60°08'8.99"	60°03'35.49"	60°03'33.99"
ST5	330°03'52.99"	330°03'4.00"	60°07'37.49"	60°07'46.99"	60°03'47.49"	60°03'38.99"

APÊNDICE BB – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	LP4(PD)	LP4 (PI)	LP5(PD)	LP5 (PI)	LP6 (PD)	LP6 (PI)
ST1	59°55'9.00"	59°55'10.99"	229°46'18.50"	229°46'18.50"		
ST2	59°55'9.50"	59°55'10.99"	229°46'18.00"	229°46'19.99"	229°58'44.50"	229°58'40.50"
ST3	59°55'8.50"	59°55'18.99"	229°46'18.00"	229°46'20.49"	229°58'51.99"	229°58'37.49"
ST4	59°55'8.50"	59°55'9.50"	229°46'38.99"	229°46'46.49"	229°58'49.00"	229°58'46.49"
ST5	59°55'8.50"	59°55'9.00"	229°47'17.49"	229°47'20.50"	229°58'42.99"	229°58'48.50"

APÊNDICE BC – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	x	σ_x	y	σ_y	χ^2
ST2	149978,62040	0,00906	250099,64513	0,00908	3,67469
ST5	149978,61843	0,00891	250099,64411	0,00893	3,55376
ST9	149978,60919	0,00988	250099,64911	0,00991	4,36993
ST11	149978,60997	0,01158	250099,65030	0,01161	6,00125
ST14	149978,59441	0,01194	250099,65758	0,01197	6,37626
ST18	149978,58530	0,01434	250099,65669	0,01437	9,20313
ST20	149978,58195	0,01535	250099,68166	0,01538	10,54150
ST22	149978,58747	0,01564	250099,67834	0,01567	10,94119

APÊNDICE BD – RESULTADO DO MMQ- MODELO PARAMÉTRICO DAS COORDENADAS DAS COORDENADAS DO CENTRO DAS SOLDAS TRANSVERSAIS (X, Y) E TESTES ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	x	σ_x	y	σ_y	χ^2
ST1	149978,61214	0,00292	250099,64399	0,00369	0,90854
ST2	149978,61195	0,00203	250099,64578	0,00203	1,08619
ST3	149978,61155	0,00237	250099,64639	0,00237	1,48083
ST4	149978,60978	0,00219	250099,64835	0,00219	1,25876
ST5	149978,60615	0,00265	250099,65024	0,00265	1,85029

APÊNDICE BE – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	R (m)	σ_R (m)	χ^2
ST2	149978,62545	0,00146	250099,64242	0,00142	1,83878	0,00102	0,11019
ST5	149978,60914	0,00437	250099,63789	0,00426	1,83574	0,00305	0,98521
ST9	149978,60723	0,01092	250099,65721	0,01073	1,83793	0,00766	6,20963
ST11	149978,58835	0,00774	250099,65227	0,00765	1,83793	0,00543	3,12991
ST14	149978,58147	0,01180	250099,65048	0,01167	1,82694	0,00827	7,27616
ST18	149978,55606	0,00264	250099,65241	0,00224	1,82120	0,00173	0,12675
ST20	149978,53282	0,00930	250099,66257	0,00801	1,83346	0,00616	1,59673
ST22	149978,52136	0,01032	250099,66409	0,00896	1,72453	0,00687	1,97829

APÊNDICE BF – DIREÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO DA SOLDA TRANSVERSAL A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	L1(PD)	L1(PI)	L2(PD)	L2(PI)	L3(PD)	L3(PI)
ST2	16°30'20.99"	16°30'21.49"	359°59'50.49"	359°59'45.49"	0°0'6.99"	0°0'9"
ST5	16°30'16.49"	16°30'16.49"	359°59'51.00"	359°59'46.49"	0°0'6.99"	0°0'10"
ST9	16°29'58.99"	16°30'6.99"	0°0'9"	0°0'14.00"	0°0'6.99"	0°0'0.50"
ST11	16°29'47.00"	16°29'50.49"	0°0'18"	0°0'14.50"	0°0'2.49"	0°0'1"
ST14	16°28'57.00"	16°29'16.50"	0°0'56.00"	0°0'43.49"	0°0'9"	0°0'6"
ST18	16°28'45.50"	16°29'4.49"	0°1'3.50"	0°1'11.49"	0°0'32.50"	0°0'1,50"
ST20	16°28'57.50"	16°29'7.50"	0°1'53.50"	0°1'52.5"	359°30'43.99"	359°30'22.50"
ST22	16°28'31.50"	16°28'37.49"	0°1'17.00"	0°2'0.99"	359°30'30.49"	359°30'2.99"

APÊNDICE BG – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3(SEGUNDA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	R (m)	σ_R (m)	χ^2
ST2	149978,62545	0,00146	250099,64242	0,00142	1,83878	0,00102	0,11019
ST5	149978,60914	0,00437	250099,63789	0,00426	1,83574	0,00305	0,98521
ST9	149978,60723	0,01092	250099,65721	0,01073	1,83793	0,00766	6,20963
ST11	149978,58835	0,00774	250099,65227	0,00765	1,83793	0,00543	3,12991
ST14	149978,58147	0,01180	250099,65048	0,01167	1,82694	0,00827	7,27616
ST18	149978,55606	0,00264	250099,65241	0,00224	1,82120	0,00173	0,12675
ST20	149978,53282	0,00930	250099,66257	0,00801	1,83346	0,00616	1,59673
ST22	149978,52136	0,01032	250099,66409	0,00896	1,72453	0,00687	1,97829

APÊNDICE BH – RESULTADO DO MÉTODO COMBINADO A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 E LP6 (SEGUNDA CAMPANHA).

ST	x (m)	σ_x (m)	y (m)	σ_y (m)	R (m)	σ_R (m)	χ^2
ST1	149978,61090	0,00074	250099,64793	0,00065	1,84373	0,00049	0,10228
ST2	149978,61302	0,00038	250099,64931	0,00035	1,84129	0,00028	2,71114
ST3	149978,60552	0,00256	250099,64853	0,00293	1,83939	0,00195	1,62678
ST4	149978,60315	0,00314	250099,65354	0,00358	1,83945	0,00238	2,43883
ST5	149978,60699	0,00233	250099,65680	0,00267	1,83978	0,00177	1,35108

APÊNDICE BI – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3.

SR	L3(1)	L3(2)	L2(1)	L2(2)	L1(1)	L1(2)
ST1			0,007248825	0,007248826	0,006109877	0,006109902
ST2	0,007963375	0,007963372	0,007248475	0,007248472	0,006109876	0,006109908
ST3	0,007963384	0,007963387	0,007248493	0,007248491	0,006109877	0,00611002
ST4	0,007963367	0,007963346	0,007248519	0,007248517	0,006109879	0,00611005
ST5	0,007963388	0,007963379	0,007248495	0,007248498	0,006109877	0,006110071
ST6	0,007963382	0,007963378	0,007248506	0,007248506	0,006109879	0,006110081
ST7	0,007963379	0,007963362	0,007248507	0,007248507	0,00610988	0,006110103
ST8	0,007963358	0,007963346	0,007248504	0,007248504	0,00610988	0,006110119
ST9	0,007963366	0,007963342	0,007248494	0,007248494	0,006109881	0,006110141
ST10	0,007963327	0,007963353	0,007248526	0,007248526	0,00610988	0,006110167
ST11	0,007963356	0,007963369	0,007248521	0,007248521	0,006109882	0,006110185
ST12	0,007963355	0,007963319	0,007248552	0,007248552	0,006109882	0,0061102
ST13	0,007963371	0,007963361	0,007248535	0,007248535	0,006109886	0,006110218
ST14	0,007963366	0,007963347	0,007248542	0,007248542	0,006109885	0,006110233
ST15	0,007963389	0,007963386	0,007248544	0,007248544	0,006109889	0,006110249
ST16	0,007963335	0,007963331	0,007248545	0,007248545	0,006109891	0,006110269
ST17	0,007963335	0,007963288	0,007248535	0,007248535	0,006109894	0,00611028
ST18	0,007963331	0,007963233	0,007248681	0,007248681	0,006109895	0,006110288
ST19	0,007963544	0,007963478	0,007248828	0,007248828	0,006109908	0,006110304
ST20	0,007963749	0,007963583	0,007248891	0,007248891	0,006109915	0,006110312
ST21	0,007963718	0,007963659	_____	_____	0,006109931	0,006110328
ST22	0,007963707	0,007963839	_____	_____	0,006109937	0,00611034
ST23	0,007963914	0,007964065	_____	_____	_____	_____
ST24	0,007964111	0,007964252	_____	_____	_____	_____
ST25	0,007964272	0,007964463	_____	_____	_____	_____
ST26	0,007964371	0,007964733	_____	_____	_____	_____
TOPO	0,007955158	0,007952998	_____	_____	_____	_____

APÊNDICE BJ – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA L1, L2 E L3.

SR	L3(1)	L3(2)	L2(1)	L2(2)	L1(1)	L1(2)
ST1	0,007200252	0,007200252	0,007918897	0,007918897	0,008827394	0,008827545
ST2	0,007200253	0,007200254	0,007918611	0,007918611	0,008827393	0,008827711
ST3	0,007200251	0,007200249	0,007918626	0,007918626	0,008827405	0,00882932
ST4	0,007200254	0,007200253	0,007918645	0,007918645	0,008827431	0,008829847
ST5	0,007200247	0,007200253	0,007918631	0,007918631	0,008827405	0,008830082
ST6	0,007200246	0,007200251	0,00791862	0,00791862	0,008827429	0,008830236
ST7	0,007200244	0,007200249	0,007918621	0,007918621	0,008827445	0,008830573
ST8	0,007200251	0,007200255	0,007918618	0,007918618	0,008827448	0,008830893
ST9	0,007200247	0,007200256	0,007918628	0,007918628	0,008827459	0,008831215
ST10	0,00720025	0,007200258	0,007918619	0,007918619	0,008827451	0,008831606
ST11	0,007200244	0,007200253	0,007918598	0,007918598	0,008827477	0,008831876
ST12	0,007200245	0,007200257	0,007918622	0,007918622	0,008827473	0,008832105
ST13	0,007200245	0,007200256	0,007918625	0,007918625	0,00882746	0,008832372
ST14	0,007200247	0,00720026	0,00791863	0,00791863	0,008827451	0,008832602
ST15	0,007200248	0,007200254	0,007918632	0,007918632	0,008827497	0,008832845
ST16	0,007200248	0,007200249	0,00791865	0,00791865	0,00882753	0,00883314
ST17	0,007200247	0,007200243	0,007918643	0,007918643	0,008827505	0,008833313
ST18	0,007200246	0,007200271	0,007918753	0,007918753	0,008827522	0,00883351
ST19	0,007200256	0,007200283	0,007918864	0,007918864	0,008827716	0,008833673
ST20	0,007200266	0,007200292	0,007918912	0,007918912	0,008827818	0,00883379
ST21	0,007200284	0,007200312	—	—	0,008828061	0,008834022
ST22	0,007200308	0,007200332	—	—	0,008828147	0,008834287
ST23	0,00720033	0,007200353	—	—	—	—
ST24	0,007200349	0,007200377	—	—	—	—
ST25	0,00720036	0,007200402	—	—	—	—
ST26	0,007199284	0,007199056	—	—	—	—
TOPO	0,007200252	0,007200252	—	—	—	—

APÊNDICE BK – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3.

ST	LP3(1)	LP3(2)	LP2(1)	LP2(2)	LP1(1)	LP1(2)
ST 1	0,0124288 8	0,0124288 9	—	—	0,011651793 3	0,011651782 3
ST 2	0,0124288 6	0,0124288 9	0,010644464 2	0,010644466 1	0,011651795 7	0,011651813 6
ST 3	0,0124288 6	0,0124288 4	0,010644462 8	0,010644466 4	0,011651793 6	0,011651846 7
ST 4	0,0124288 3	0,0124288 5	0,010644465 0	0,010644465 7	0,011651794 0	0,011651906 2
ST 5	0,0124288 8	0,0124288 8	0,010644464 0	0,010644472 2	0,011651794 0	0,011651927 7

APÊNDICE BL – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP1, LP2 E LP3.

ST	LP3(1)	LP3(2)	LP2(1)	LP2(2)	LP1(1)	LP1(2)
ST1	0,01118368	0,01118368	—	—	0,0140516193	0,0140516394
ST2	0,01118368	0,01118370	0,013638106	0,013638107	0,0140516193	0,0140521964
ST3	0,01118368	0,01118368	0,013638105	0,01363811	0,0140516235	0,0140527843
ST4	0,01118368	0,01118367	0,013638115	0,013638107	0,0140516315	0,0140538409
ST5	0,01118367	0,01118368	0,013638115	0,013638111	0,0140516319	0,0140542242

APÊNDICE BM – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS X A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6.

ST	LP4(1)	LP4(2)	LP5(1)	LP5(2)	LP6(1)	LP6(2)
ST 1	0,011049378 3	0,011049373 9	—	—	—	—
ST 2	0,011049378 5	0,011049374 0	0,013066636 1	0,013066594 6	0,013066636 1	0,013066594 7
ST 3	0,011049378 6	0,011049374 1	0,013066647 4	0,013066609 8	0,013066647 4	0,013066609 8
ST 4	0,011049378 0	0,011049373 8	0,013066639 8	0,013066606 6	0,013066639 8	0,013066606 6
ST 5	0,011049377 5	0,011049370 8	0,013066640 7	0,013066608 7	0,013066640 8	0,013066608 7

APÊNDICE BN – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DE ERROS DAS COORDENADAS Y A PARTIR DOS PONTOS DE REFERÊNCIA LP4, LP5 E LP6

ST	LP4(1)	LP4(2)	LP5(1)	LP5(2)	LP6(1)	LP6(2)
ST 1	0,013313805	0,013313812 7	—	—	—	—
ST 2	0,013313808 7	0,013313814 4	0,012707455 9	0,012707530 5	0,01360034 7	0,01360041 7
ST 3	0,013313809 7	0,013313816 7	0,012707457 2	0,012707532 3	0,01360034 8	0,01360041 9
ST 4	0,013313798 2	0,013313810 6	0,012707459 8	0,012707531 9	0,01360035 1	0,01360041 8
ST 5	0,013313788 4	0,013313800 7	0,012707456 5	0,012707521 8	0,01360034 8	0,01360040 9

ANEXO A – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO RECF - RECIFE

0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC
 Data: 06/01/2000
 Atualização: 17/11/2017 - Atualização de Firmware

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: RECIFE
 Ident. da Estação: RECF
 Código SAT: [93110](#)
 Código Internacional: 41617M001
 Informações Adicionais: Esta estação pertence à Rede de Densificação do IGS e à Rede de Referência do SIRGAS

2. Informação sobre a localização

Cidade: Recife
 Estado: Pernambuco
 Informações Adicionais: Pino de centragem forçada com uma chapa cravada no pilar de concreto de base retangular, medindo 0,40 x 0,22 m e altura de 1,37 m acima da laje de concreto do prédio da Biblioteca. 1,37m do nível do terraço, na parte sul da laje de concreto da Biblioteca Central da UFPE, na Avenida dos Reitores, bairro Cidade Universitária e a 0,60 km além da RN 3640 X.

3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 08° 03' 3,46972"	Sigma:	0,001 m
Longitude:	- 34° 57' 5,45911"	Sigma:	0,002 m
Alt. Elip.:	20,180 m	Sigma:	0,002 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	5.176.588,6532 m	Sigma:	0,002 m
Y:	-3.618.162,1632 m	Sigma:	0,001 m
Z:	-887.363,9200 m	Sigma:	0,001 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	9.109.554,894 m		
UTM (E):	284.931,043 m		
MC:	-33		

4. Informações do equipamento GNSS

4.1. Receptor

4.1.1 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8
 Número de Série - 4923K35519
 Versão do Firmware - 48.01 (Principal)
 Atualização do Firmware - 17/11/2017 às 12:25 UTC

4.1.2 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8
 Número de Série - 4923K35519
 Versão do Firmware - 4.87 (Principal)
 Atualização do Firmware - 03/02/2015 às 17:00 UTC

4.1.3 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8
 Número de Série - 4923K35519
 Versão do Firmware - 4.85 (Principal)
 Atualização do Firmware - 19/09/2014 às 12:00 UTC

4.1.4	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR8
	Número de Série	- 4923K35519
	Versão do Firmware	- 4.70 (Principal)
	Atualização do Firmware	- 14/03/2013 às 18:00 UTC
4.1.5	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR8
	Número de Série	- 4923K35519
	Versão do Firmware	- 4.41 (Principal)
	Atualização do Firmware	- 21/11/2012 às 16:15 UTC
4.1.6	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR8
	Número de Série	- 4923K35519
	Versão do Firmware	- 4.17 (Principal)
	Data de Instalação	- 28/08/2012 às 20:22 UTC
4.1.7	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR5
	Número de Série	- 4651K03572
	Versão do Firmware	- 3.84 (Principal)
	Atualização do Firmware	- 20/10/2009 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 28/08/2012 às 20:21 UTC
4.1.8	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR5
	Número de Série	- 4651K03572
	Versão do Firmware	- 3.50 (Principal)
	Data de Instalação	- 08/05/2007 às 00:00 UTC
4.1.9	Tipo do Receptor	- TRIMBLE 4000SSI
	Número de Série	- 3633A16744
	Versão do Firmware	- 7.01 (Principal)
	Data de Instalação	- 05/12/2006 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 07/05/2007 às 00:00 UTC
4.1.10	Tipo do Receptor	- TRIMBLE 4000SSI
	Número de Série	- 16740
	Versão do Firmware	- 7.29 (Principal)
	Atualização do Firmware	- 04/09/2004 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 04/12/2006 às 00:00 UTC
4.1.11	Tipo do Receptor	- TRIMBLE 4000SSI
	Número de Série	- 16740
	Versão do Firmware	- 7.22 (Principal)
	Data de Instalação	- 06/07/1999 às 00:00 UTC

4.2. Antena

4.2.1	Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 4940353510
	Altura da Antena (m)	- 0,0710 (distância vertical do topo do marco à base da antena.)
	Data de Instalação	- 11/10/2017 às 16:30 UTC
4.2.2	Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 4951353656
	Altura da Antena (m)	- 0,0710 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena.)
	Data de Instalação	- 20/03/2015 às 14:47 UTC
	Data de Remoção	- 11/10/2017 às 16:00 UTC

4.2.3	Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 4951353655
	Altura da Antena (m)	- 0,0710 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena.)
	Data de Instalação	- 28/08/2012 às 20:22 UTC
	Data de Remoção	- 20/03/2015 às 14:36 UTC
4.2.4	Tipo de Antena	- ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2 (TRM55971.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM55971.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 30337723
	Altura da Antena (m)	- 0,0710 (distância vertical do topo da torre à base da antena)
	Data de Instalação	- 08/05/2007 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 28/08/2012 às 20:21 UTC
4.2.5	Tipo de Antena	- DORNE MARGOLIN T (TRM29659.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM29659.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 0220070175
	Altura da Antena (m)	- 0,0700 (distância vertical do topo da torre à base da antena)
	Data de Instalação	- 04/09/2004 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 07/05/2007 às 00:00 UTC
4.2.6	Tipo de Antena	- DORNE MARGOLIN T (TRM29659.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM29659.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 0220070175
	Altura da Antena (m)	- 0,1290 (distância vertical do topo da torre à base da antena)
	Data de Instalação	- 06/07/1999 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 03/09/2004 às 00:00 UTC

5. Informações Complementares

5.1. Para informações técnicas contatar:

Nome: IBGE/DGC/Coordenação de Geodésia
 Endereço: Av. Brasil, 15.671, CEP 21.241-051, Rio de Janeiro, RJ
 Telefone: (21) 2142-4935
 FAX: (21) 2142-4859
 Home Page: www.ibge.gov.br
 Contato: rbmc@ibge.gov.br

5.2. Para informações sobre comercialização e aquisição de dados contatar:

Nome: Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE
 Endereço: Rua General Canabarro, 706, CEP 20271-201, Rio de Janeiro, RJ
 Telefone: 0800-721-8181
 Contato: ibge@ibge.gov.br

5.3. Instituições participantes

A RBMC conta com o apoio das seguintes instituições:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/parcerias.shtm>

ANEXO B – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO PBJP – JOÃO PESSOA

0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC
 Data: 23/04/2013
 Atualização: 24/04/2014 - Troca de equipamento

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: JOÃO PESSOA
 Ident. da Estação: PBJP
 Código SAT: [96557](#)
 Código Internacional: 41698M001

2. Informação sobre a localização

Cidade: João Pessoa
 Estado: Paraíba

Informações Adicionais: Pilar cilindro de concreto, medindo 0,30 m de diâmetro com altura de 1,20 m sobre o beiral do telhado do Laboratório de Geoprocessamento. Possui um dispositivo de centragem forçada, padrão IBGE e uma chapa de metal estampada: SAT 96557. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, Laboratório de Geoprocessamento do Campus. Av. 1º de Maio, 720 - Jaguaribe - João Pessoa-PB.

3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 07° 08' 10,60120"	Sigma:	0,001 m
Longitude:	- 34° 52' 24,32631"	Sigma:	0,002 m
Alt. Elip.:	49,070 m	Sigma:	0,008 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	5.192.505,8149 m	Sigma:	0,007 m
Y:	-3.618.762,7879 m	Sigma:	0,005 m
Z:	-787.096,9214 m	Sigma:	0,001 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	9.210.765,698 m		
UTM (E):	293.103,038 m		
MC:	-33		

4. Informações do equipamento GNSS

4.1.Receptor

4.1.1 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR5
 Número de Série - 4651K03530
 Versão do Firmware - 4.05 (Principal)
 Data de Instalação - 24/04/2014 às 18:47 UTC

4.1.2 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETRS
 Número de Série - 4643124424
 Versão do Firmware - 1.3-2 (Principal)
 Atualização do Firmware - 05/12/2013 às 10:44 UTC
 Data de Remoção - 24/04/2014 às 18:00 UTC

4.1.3 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETRS
 Número de Série - 4643124424
 Versão do Firmware - 1.2-0 (Principal)
 Data de Instalação - 23/04/2013 às 00:00 UTC

4.2. Antena

4.2.1	Tipo de Antena	- ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2 (TRM55971.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM55971.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 30336569
	Altura da Antena (m)	- 0,0080 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)
	Data de Instalação	- 24/04/2014 às 18:47 UTC
4.2.2	Tipo de Antena	- ZEPHYR GEODETIC (TRM41249.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM41249.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 60177090
	Altura da Antena (m)	- 0,0080 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)
	Data de Instalação	- 23/04/2013 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 24/04/2014 às 18:00 UTC

5. Informações Complementares

5.1. Para informações técnicas contatar:

Nome: IBGE/DGC/Coordenação de Geodésia
 Endereço: Av. Brasil, 15.671, CEP 21.241-051, Rio de Janeiro, RJ
 Telefone: (21) 2142-4935
 FAX: (21) 2142-4859
 Home Page: www.ibge.gov.br
 Contato: rbmc@ibge.gov.br

5.2. Para informações sobre comercialização e aquisição de dados contatar:

Nome: Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE
 Endereço: Rua General Canabarro, 706, CEP 20271-201, Rio de Janeiro, RJ
 Telefone: 0800-721-8181
 Contato: ibge@ibge.gov.br

5.3. Instituições participantes

A RBMC conta com o apoio das seguintes instituições:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/parcerias.shtm>

ANEXO C – RELATÓRIO DE INFORMAÇÃO DE ESTAÇÃO PBCG – CAMPINA GRANDE

0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC Data: 03/04/2008
 Atualização: 20/10/2009 - Atualização de Firmware

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: CAMPINA GRANDE
 Ident. da Estação: PBCG
 Código SAT: [92447](#)
 Código Internacional: 41656M001

2. Informação sobre a localização

Cidade: Campina Grande

Estado: Paraíba

Informações Adicionais: Cilíndrico de concreto medindo 1,40 m de altura e 0,20 m de diâmetro, elevado sobre plataforma de concreto medindo 0,80 m x 0,80 m, por 0,20 m de altura, Possui no topo um pino de centragem forçada. Na laje superior do bloco CM pertencente a coodenação de Engenharia. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) - Rua Aprígio Veloso, 882 Bairro Bodocongó.

3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 07° 12' 49,24013"	Sigma:	0,001 m
Longitude:	- 35° 54' 25,69568"	Sigma:	0,001 m
Alt. Elip.:	534,100 m	Sigma:	0,004 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	5.125.899,4249 m	Sigma:	0,003 m
Y:	-3.711.505,6292 m	Sigma:	0,002 m
Z:	-795.650,6201 m	Sigma:	0,001 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	9.201.606,164 m		
UTM (E):	178.917,588 m		
MC:		-33	

4. Informações do equipamento GNSS

4.1.Receptor

4.1.1 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR5
 Número de Série - 4651K03604
 Versão do Firmware - 3.84 (Principal)
 Atualização do Firmware - 20/10/2009 às 00:00 UTC

4.1.2 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR5
 Número de Série - 4651K03604
 Versão do Firmware - 3.50 (Principal)
 Data de Instalação - 08/12/2007 às 00:00 UTC

4.2. Antena

4.2.1 Tipo de Antena	- ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2 (TRM55971.00)
URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM55971.00%2BNONE.gif
Número de Série	- 30260461
Altura da Antena (m)	- 0,0080 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)
Data de Instalação	- 08/12/2007 às 00:00 UTC

5. Informações Complementares

5.1. Para informações técnicas contatar:

Nome: IBGE/DGC/Coordenação de Geodésia
Endereço: Av. Brasil, 15.671, CEP 21.241-051, Rio de Janeiro, RJ
Telefone: (21) 2142-4935
FAX: (21) 2142-4859
Home Page: www.ibge.gov.br
Contato: rbmc@ibge.gov.br

5.2. Para informações sobre comercialização e aquisição de dados contatar:

Nome: Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE
Endereço: Rua General Canabarro, 706, CEP 20271-201, Rio de Janeiro, RJ
Telefone: 0800-721-8181
Contato: ibge@ibge.gov.br

5.3. Instituições participantes

A RBMC conta com o apoio das seguintes instituições:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/parcerias.shtm>